

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování



ZÁVISLOST TEPLoty NA VIBRACÍCH POHONNÝCH JEDNOTEK

Temperature dependence of the vibration motor units

Studijní program:	P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2302V019 Stavba výrobních strojů a zařízení
Školitel:	prof. Ing. Josef Jurman, CSc.
Školitel specialista:	Ing. Mečislav Hudeczek, Ph.D.
Doktorand:	Ing. Lucie Gabrhelová

Ostrava 2014

Na závěr mého doktorského studia na Fakultě strojní, VŠB – TU Ostrava předkládám k obhajobě svoji disertační práci.

Při této příležitosti bych ráda poděkovala za pomoc při studiu a řešení dané problematiky svému školiteli panu prof. Ing. Josefu Jurmanovi, CSc., dále za odborné konzultace a praktické rady svému školiteli a specialistovi v oboru panu Ing. Mečislavu Hudeczkovi, Ph.D., který celý projekt sponzoroval, a jeho celé firmě HUDECZEK Service, s. r. o, u níž mi bylo umožněno celý projekt realizovat.

Anotace

GABRHELOVÁ L.: Závislost teploty na vibracích pohonných jednotek, VŠB – TU Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 114 str., 35 přílohy, disk CD

V současné době se stále více firem orientuje na **ekonomicky nenáročné řešení z pohledu optimalizace nákladů**. Základní myšlenkou tedy bylo zjistit, zda by se dalo nahradit složité jak časově tak finančně nákladné měření vibrací za bezpečnější a časově méně náročné měření teploty.

Disertační práce se zabývá zjišťováním závislosti teploty na vibracích pohonných jednotek. Účelem této práce je tudíž stanovit metodiku pro vyhodnocování závislosti teploty na vibracích, jež by umožnila v provozních podmínkách využít jednoduchou, technicky a **ekonomicky** nenáročnou metodu.

Součástí disertační práce je navržení a následná konstrukce experimentálního modelu, na kterém byly simulovány vibrace a měřené teplotní pole.

Annotation

GABRHELOVÁ L.: Temperature dependence of the vibration motor units, VŠB – TU Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 114 str., 35 appendix, compact disc

Economically effective solution is the most audible term in majority of companies nowadays. The basic idea was to find out whether it could be difficult to replace time and financially costly vibration measurements for safer and less time - consuming measurement of temperature. Dissertation is concerned with detecting temperature dependences on vibration of power units. The purpose of this work is to establish a methodology for assessing the dependence of temperature on vibration, which would allow the operating conditions to use simple, technically and economically less demanding method. The dissertation also includes the design and construction of the experimental model of power unit for purpose of vibration simulation and temperature field measurement

1	ÚVOD	12
2	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU	13
2.1	LOŽISKA.....	14
2.1.1	<i>Konstrukce kluzných ložisek</i>	<i>14</i>
2.1.2	<i>Konstrukce valivých ložisek</i>	<i>17</i>
2.1.3	<i>Příčiny opotřebení ložisek</i>	<i>21</i>
2.2	POHON	23
2.2.1	<i>Podle jednotlivých pracovních mechanismů může být pohon určen:.....</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Dle pohybu výstupního členu pracovního mechanismu rozlišujeme pohony:.....</i>	<i>24</i>
2.2.3	<i>Skladba pohonu</i>	<i>24</i>
2.2.4	<i>Přenos a přeměna energie v pohonu</i>	<i>24</i>
2.2.5	<i>Přenos energie v pohonu</i>	<i>25</i>
2.2.6	<i>Diagnostika pohonných jednotek</i>	<i>26</i>
2.2.7	<i>Diagnostika ložisek</i>	<i>27</i>
2.3	SPOJKY A PŘEVODY	27
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	29
4	ZÁSADY PRO NAVRŽENÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU	30
4.1	VZNIK A ŠÍŘENÍ TEPLA A VIBRACÍ ROTAČNÍCH STROJŮ	31
4.1.1	<i>Vibrace u rotačních strojů</i>	<i>39</i>
4.1.2	<i>Základní principy vzniku chvění.....</i>	<i>39</i>
4.2	TEPLOTA.....	47
4.2.1	<i>Měření teplot a teplotních polí pomocí infračervené termografické kamery</i>	<i>49</i>
4.3	VIBRODIAGNOSTIKA	54
4.3.1	<i>Rychlá Fourierova transformace – FFT</i>	<i>55</i>
5	METODY A POSTUP ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	58
5.1	NÁVRH MĚŘICÍHO ŘETĚZCE A EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVIŠTĚ	59
5.2	VÝSTUPY.....	59
5.3	POŽADAVKY NA EXPERIMENTÁLNÍ MODEL	61
5.3.1	<i>Navržení experimentálního modelu</i>	<i>62</i>
5.4	ZAPOJENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU A NASTAVENÍ OTÁČEK	64
6	NÁVRH MĚŘICÍHO ŘETĚZCE A METODIKY MĚŘENÍ	67
6.1	POLOHA STATORU VŮČI ROTORU ELEKTROMOTORU	67
6.2	MĚŘENÍ A PROVOZNÍ REŽIMY NA MODELU ZŘÍZENÉHO EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVIŠTĚ	67
6.3	MĚŘENÍ VIBRACÍ NA ZŘÍZENÉM EXPERIMENTÁLNÍM MODELU	68
6.3.1	<i>Měření vibrací - přístroj ADASH A 4300 – VA 3.....</i>	<i>70</i>

6.3.2	Měření teplot a teplotních polí	71
6.3.3	Měření teploty okolí a vlhkosti na experimentálním pracovišti	74
6.3.4	Teplota okolí	74
6.3.5	Vzdálenost	74
6.3.6	Relativní vlhkost	74
6.4	PODMÍNKY PRO TERMOGRAFICKÉ MĚŘENÍ	74
6.5	VLASTNÍ MĚŘENÍ	75
6.6	NEJISTOTY MĚŘENÍ	75
6.7	MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN NA EXPERIMENTÁLNÍM MODELU	79
7	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT U LOŽISKA L2	80
7.1	MĚŘENÍ ZE DNE 30. 10. 2012 – VYOSENÝ BEZ ZÁTĚŽE	80
7.2	MĚŘENÍ ZE DNE 31. 10. 2012 – VYOSENÝ POSTUPNĚ ZATĚŽOVANÝ	84
7.3	MĚŘENÍ ZE DNE 1. 11. 2012 – VYOSENÝ ZATÍŽENÝ (KONSTANTNĚ)	88
7.4	MĚŘENÍ ZE DNE 6. 11. 2012 – SOUOSÝ BEZ ZÁTĚŽE	90
7.5	MĚŘENÍ ZE DNE 7. 11. 2012 – SOUOSÝ POSTUPNĚ ZATĚŽOVANÝ	93
7.6	MĚŘENÍ ZE DNE 8. 11. 2012 – SOUOSÝ ZATÍŽENÝ (KONSTANTNĚ)	95
8	KONKRÉTNÍ ZÁVĚRY PRO REALIZACI V PRAXI	99
9	ZÁVĚR PRÁCE A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ POSTUP VE VÝZKUMU A VÝVOJI	101
10	CONCLUSION OF THE DISSERTATION AND	104
	RECOMMENDATIONS FOR NEXT STEPS IN RESEARCH AND DEVELOPMENT	104
11	LITERATURA	108
12	SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ	111
13	PŘÍLOHY	115
14	SEZNAM OBRÁZKŮ	145
15	SEZNAM TABULEK	149

Seznam symbolů a značek

$\sum \Delta P_{zt}$	součet všech ztrát výkonu	[W, kW]
A	amplituda kmitavého pohybu	[mm.s ⁻¹]
C	základní dynamická únosnost ložiska	[-]
D	průměr	[m, mm]
E_k	kinetická energie	[J]
E_p	potenciální energie	[J]
F	zatížení ložiska	[N]
F	síla	[N]
F_e	pružná síla	[N]
G_w	přenos energie	[J]
$He(\lambda)$	teplotní záření	[W.m ⁻²]
$H_0(T, \lambda)$	spektrální hustota intenzity vyzařování	[W.m ⁻²]
K	tuhost pružiny	[N.m ⁻¹]
P	výkon	[W, kW]
P_1	vstupní výkon	[W, kW]
P_2	výstupní výkon	[W, kW]
P_d	střední průměr	[m, mm]
P_F	zatížení ložiska	[N]
Q_D	teplo vzniklé dynamickými účinky v ložisku	[J]
Q_E	teplo přijaté ložiskem z ostatních částí elektromotoru	[J]
Q_M	teplo odebrané mazivem	[J]
Q_O	teplo odebrané okolím	[J]
Q_P	teplo na povrchu ložiskového štítu	[J]
Q_S	teplo vzniklé statickými účinky v ložisku	[J]
Q_T	teplo vzniklé třecími procesy	[J]
Q_V	teplo ztracené vedením	[J]
S_i	průmět zatížené části kluzné plochy ložiska	[mm ²]
T	teplota	[°]
W_e	energie	[J]
W_1	energie na vstupu	[J]
W_2	energie na výstupu	[J]
X_{ave}	průměr neboli střední hodnota	[m]

X_i	hodnota každého vzorku	[-]
Y	integrační konstanty	[-]
a_1	součinitel pravděpodobnosti havárie ložiska	[-]
a_2	součinitel materiálu	[-]
a_3	součinitel provozních podmínek.	[-]
b_i	šířka ideální nosné plochy	[m, mm]
c	rychlost elektromagnetického záření ve vakuu	[m.s-1]
c_2	měrná tepelná kapacita	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
h	Planckova konstanta	[J.s]
i	počet válců	[ks]
i_l	počet lamel rotoru	[ks]
i_p	převodový poměr	[-]
l	zdvih pístu	[m, mm]
l_1	šířka kluzné plochy mezi mazací drážkou a čelním okrajem ložiska	[m, mm]
l_d	délka drážky	[m, mm]
l_i	šířka ložiska	[m, mm]
m	polytropický exponent	[-]
m	hmotnost	[kg]
n	otáčky	[min ⁻¹]
n_e	počet valivých elementů	[ks]
p	počet pólových dvojic	[-]
p_l	tlak oleje v mazací kapse	[Pa]
p_l	exponent typu ložiska	[-]
y	výchylka	[-]
μ_r	relativní permeabilita prostředí	[H m-1]
ε_r	relativní permitivita prostředí	[F m-1]
$\alpha(\lambda)$	funkce teploty	[-]
ε	emisivita	[-]
η	účinnost	[-]
η_c	celková účinnost	[-]
η_m	mechanická účinnost	[-]
λ	vlnová délka	[m]
v	kmitočet záření	[nm]
φ	středový úhel	[°]

φ_k	integrační konstanty	[-]
φ_1	kontaktní úhel	[°]
ω	úhlová frekvence	[rad.s ⁻¹]

Seznam použitých zkratk

BPFI - Ball Passing Frequency Inner Race

Frekvence kmitání způsobená poškozením vnitřního kroužku

BPFO - Ball Passing Frequency Outer Race

Frekvence kmitání způsobená poškozením vnějšího kroužku

BSP - Ball Spin Frequency

Frekvence kmitání způsobená poškozením valivého elementu

Overall - Celkové vibrace

Číslo reprezentující množství energie obsažené v pásnu mezi dvěma frekvencemi

DDS 2007

Diagnostický systém pro archivaci a analýzu dat

FFT - Fast Fourier Transformation

Rychlá Fourierova transformace

ČSN - Česká soustava norem

ISO - International Organization for Standardization

Mezinárodní organizace pro normalizaci

RMS - Root Mean Square

Efektivní hodnota

RPM - Revolution Per Minute

Otáčky za minutu

Špička - Peak

Vzdálenost mezi vrcholem amplitudy a nulovou úrovní signálu

Špička – špička - Peak to peak

Vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny

SmartView – Diagnostický software pro analýzu naměřených dat.

1 Úvod

Diagnostiku definujeme jako nauku o zjišťování vad a poruch. Jestliže sledovaný objekt, jehož stav se snažíme zjistit, je technického charakteru, potom mluvíme o technické diagnostice.

Technická diagnostika využívá různých fyzikálních vlastností při měření diagnostických parametrů a vyhodnocování různých fyzikálních procesů probíhajících ve strojních systémech. Naměřené a vyhodnocené diagnostické signály nám poskytují informace o objektivním technickém stavu sledovaného objektu.

Dnes už je nutností využívat diagnostiku ve všech strojních systémech, v nichž se využívá pohonných prvků různých pracovních mechanismů. V současné době jsou již na pracovní mechanismy kladeny velmi vysoké nároky z hlediska životnosti, spolehlivosti a v neposlední řadě i hospodárnosti provozu. V tomto případě za pohonnou jednotku se nabízí elektromotor, který má oproti jiným typům pohonných jednotek nízkou poruchovost. Přesto však k poruchám a haváriím v důsledku poškození dochází. Závady se často projevují na ložiskách, které mohou být způsobeny nesprávnou či nedostatečnou údržbou. Stává se, že po opravě a výměně vadných ložisek za nové dojde opět k jejich opotřebení a proto by se měla zavádět technická diagnostika k zjištění příčin zvláště v případech, kdy dochází k nestandardně rychlému opotřebení.

Práce se zabývá sledováním interakce fyzikálních veličin – *teploty a vibrací* s cílem zjednodušit zjišťování současného stavu pohonných jednotek měřením jediné veličiny – teploty.

Podmínky laboratorního i provozního měření zajišťovala firma HUDECZEK Service, s.r.o., která má přístrojové vybavení, bohaté zkušenosti i zkušební stand.

2 Analýza současného stavu

U velkých soustrojí typu generátory, kompresory, čerpadla, důlní ventilátory a těžní stroje se ve většině případů měří teploty především na ložiskových jednotkách a také je měřena teplota mazacího média. Tyto údaje jsou nejčastěji zapisovány do pochůzkových knih příslušného stroje.

Co se týče vibrací, existují případy, kdy nejsou vůbec měřeny na těchto typech strojů.

Jsou-li vibrace u velkých jednotek měřeny, provádí se online nebo formou pochůzek s diagnostickým pochůzkovým přístrojem.

Na první pohled se můžeme domnívat a předpokládat, že chvění neboli vibrace a teplota jsou ve vzájemné interakci. Z toho důvodu byla zadána disertační práce.

Provoz jakéhokoliv rotačního stroje je doprovázen vznikem tepla s vibracemi, a to v jeho třecích uzlech, elektromagnetickém obvodu a ventilačním systému. Vznik teplot a vibrací přitom neznamená vždy závadu na stroji. Teploty a vibrace strojů se za normálních podmínek od jeho rozběhu za nějaký čas ustálí a jsou pak provozovány při tzv. provozních podmínkách. Tyto provozní podmínky jsou dány výrobcem stroje nebo jednotlivých komponent, případně normou nebo provozním předpisem stroje.

Dojde-li v průběhu provozu stroje ke změně jeho technického stavu (zhoršené mazání, zvýšené opotřebení, deformace součástí apod.), změní se teplota a vibrace, případně teplota a vibrace jednotlivých částí stroje. Na základě sledování změn těchto provozních parametrů v čase je možné posoudit jeho technický stav.

Při rešerši dostupné literatury nebyla zjištěna žádná závislost mezi těmito dvěma fyzikálními veličinami - teplotou a vibracemi.

Během prokazování této závislosti nejde o fyzikální definice těchto vztahů, ale jde o vyjádření obecné závislosti mezi teplotou a vibracemi, které bude sloužit k doplnění návodů pro obsluhu a údržbu strojů. Ačkoliv pravděpodobně existuje mezi těmito veličinami určitá vzájemná vazba, je důležité si uvědomit, která z příčin má za následek změnu teploty, a která změnu vibrací. Úkolem disertační práce bylo zjistit, zdali s nárůstem vibrací rostou i teploty a naopak, s rostoucími teplotami narůstají vibrace. Společně s tím působí v provozní praxi i další vlivy, jež ovlivňují jednu či druhou veličinu, jako je teplota okolí, ofukování stroje, způsob mazání, které mají vliv na měřenou teplotu ložisek, případně uložení stroje (pružné či pevné, nebo provoz v rezonanci) ovlivňující naopak velikost absolutních vibrací.

2.1 Ložiska

Ložiska rozdělujeme podle uspořádání strojních částí, umožňují pohyb v požadovaném směru či přenos pohybu lineárního nebo rotačního.

Ložiska jsou součástí technického zařízení, které umožňují přenos síly při vzájemném otáčení nebo posuvném pohybu jeho dílů. Hlavním úkolem ložisek je tedy změna translace na rotaci. Užívají se zejména k uložení čepů hřídelů, přenášejících otáčivý pohyb a k zachycení sil působících na hřídel[12].

Funkční rozdělení ložisek:

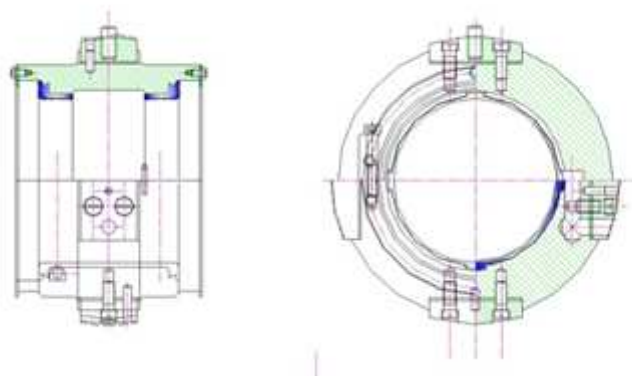
- ◆ kluzná,
- ◆ valivá,
- ◆ magnetická – používají se u strojů, které pracují ve vzduchoprázdnu při nízkých nebo vysokých teplotách, popř. v agresivních kapalinách. Magnetická ložiska není potřeba mazat. Z tohoto důvodu lze magnetická ložiska využít v jakémkoliv stroji, u něhož nesmí dojít ke kontaminaci mazivy nebo částicemi otěru, resp. není-li používání maziv slučitelné s výrobním procesem. Jejich další vlastnosti jsou nízké rotační ztráty hřídele. Tyto ztráty napovídají o tom, že provozní teploty jsou zpravidla nižší než u ložisek jiných typů, tudíž jsou kladeny nižší nároky na chlazení celého zařízení. Ložiska dosahují mnohem vyšších obvodových rychlostí oproti ložiskům hydrodynamickým nebo valivým.
- ◆ pneumatická - ložiska se vzduchovou vrstvou bez olejového mazacího systému neznečišťující vzduch a vyznačují se dlouhodobým stabilním provozem bez nutnosti údržby. V případě rozbití ložiska nedojde k poškození ostatních prvků turbíny.

2.1.1 Konstrukce kluzných ložisek

Kluzné ložisko obr. 1 je strojní součást vymezující vzájemnou polohu dvou stýkajících se částí mechanismu při jejich relativním pohybu. Tento pohyb je doprovázen kluzným třením a opotřebením.

Kluzná ložiska volíme zpravidla tam, kde potřebujeme přenést velmi vysoké zatížení. Jsou vhodná i tam, kde se nevyžaduje mazání (samomazná ložiska).

Druh ložiska volíme zejména podle funkčních, ekonomických a speciálních požadavků [9].



Obr. 1 Kluzné ložisko

Funkční požadavky – jsou rozhodující u funkčně důležitých a velkých zařízení. Mezi uvedené požadavky patří [3]:

- ◆ únosnost ložiska,
- ◆ obvodová rychlost čepu,
- ◆ ztráty třením,
- ◆ provozní teplota,
- ◆ útlum vibrací,
- ◆ hlučnost,
- ◆ přípustná nesouosost,
- ◆ trvanlivost ložiska.

Ekonomické požadavky – do ekonomických požadavků lze zařadit[3]:

- ◆ cena ložiska,
- ◆ materiálové požadavky,
- ◆ jakost a množství materiálů,
- ◆ využití materiálů,
- ◆ prostorové požadavky,
- ◆ požadavky na maziva a mazací zařízení,
- ◆ obsluhovatelnost a udržitelnost ložiska,
- ◆ možnost opravy a výměny,
- ◆ trvanlivost ložiska.

Speciální požadavky – jsou různé podle charakteru stroje např. [3]:

- ♦ velmi nízká, nebo velmi vysoká teplota okolí,
- ♦ odolnost proti korozi,
- ♦ odolnost vůči prašnému prostředí,
- ♦ nutnost použití speciálních látek jako mazivo (kyseliny, louhy nebo plyny).

Rozdělení kluzných ložisek

- ♦ hydrodynamická ložiska,
- ♦ hydrostatická ložiska.

Parciální ložiska [13]

Tento typ ložisek se používá v podmínkách, kdy se směr zátěžné síly nemění, případně je téměř neměnný. Mazací tlakový olej se přidává do mazací drážky v zatížené části kluzné plochy ložiska.

Průmět kluzné plochy ložiska D_l můžeme nahradit ideální nosnou plochou S_i , na niž by působil plný tlak oleje v mazací drážce p_1 , to je tlak za reduktorem.

Velikost určíme:

$$S_i = \frac{F}{p_1} = b_i, \quad (3.1)$$

kde S_i - průmět zatížené části kluzné plochy ložiska

b_i - šířka ideální kluzné plochy

p_1 - tlak oleje v mazací kapse

Šířce b_i ideální plochy S_i odpovídá středový úhel φ .

Za předpokladu přímkového poklesu tlaku ve směru osy ložiska je délka ideální nosné plochy l_i dána vztahem

$$l_i = l_d + \frac{1}{2}(l - l_d) = \frac{1}{2}(l + l_d), \quad (3.2)$$

kde l - šířka ložiska

l_d - délka drážky

l_i - délka ideální nosné plochy

Tlak oleje p_1 v mazací drážce klesá nejen k bočním hranám pánve, ale i k čelním okrajům až na atmosférický tlak. Rozšířením plochy mazací drážky se zvětší i ideální nosná plocha S_i , tudíž pro dané zatížení ložiska F stačí menší tlak oleje p_1 , přitom vzrůstá množství oleje protékající ložiskem Q .

Ložiskem protéká olej ve směru osy ložiska, tj. k čelním hranám, a ve směru obvodu k bočním hranám.

Ve směru osy ložiska uvažujeme průtok oleje spárou, jejíž šířka se rovná délce oblouku o středovém úhlu φ . Délka zmiňované spáry l_1 se určí z výrazu [13]

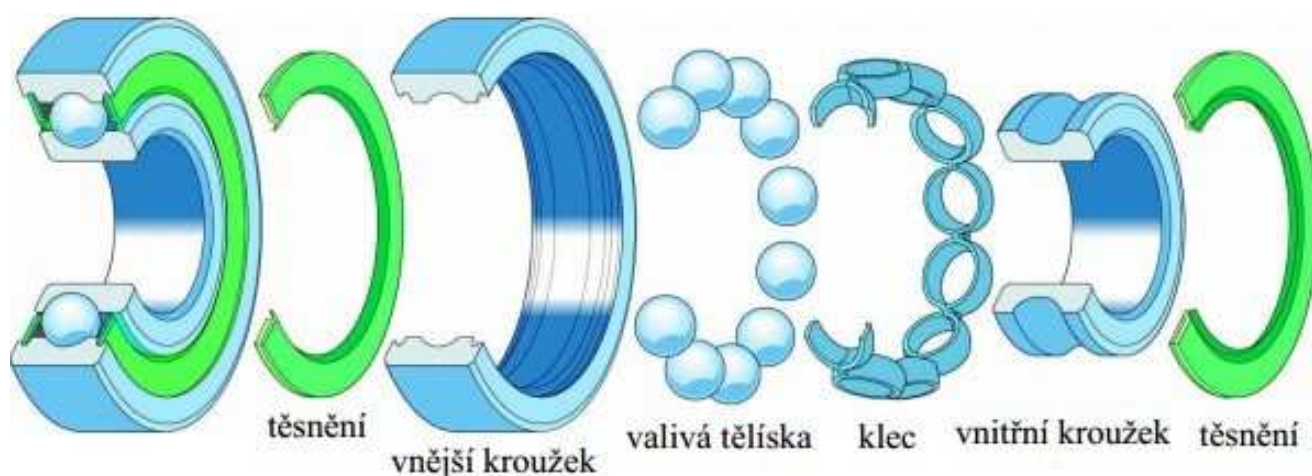
$$l_1 = \frac{1}{2}(1 - l_d), \quad (3.3)$$

kde l_d - délka drážky
 l_1 - délka spáry

2.1.2 Konstrukce valivých ložisek

U valivých ložisek je přenos zajištěn valivými segmenty, které zmenšují třecí odpor. Valivé ložisko se skládá z vnějšího – vnitřního kroužku, valivých segmentů a klece, jak vidíme na obr. č. 2.

Patří mezi nejdůležitější strojní součásti. Vzhledem ke skutečnosti, že ložiska jsou v drtivé většině konstrukcí rotačních strojů jejich nejcitlivější součástí a vzhledem k jejich funkci i tou nejpodstatnější, patří jejich kontrola a měření k jednomu ze zásadních úkonů. Z hlediska plánování a řízení údržby se proto stav ložisek řadí mezi významné faktory při zajištění provozní spolehlivosti strojů a zařízení.



Obr. 2 Schéma ložiska [20]

Prvky valivých ložisek generují specifické funkce, které jsou v přímém vztahu k poruchám ložisek a jejich konstrukčnímu uspořádání. [12]

Životnost ložisek – Základní výpočet trvanlivosti ložiska[7]

Ložisko je zatíženo po celou dobu své životnosti konstantním provozním zatížením P , pak životnost ložiska v milionech otáček (v počtu otočení) se spočte podle vztahu:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 \quad (3.4)$$

kde C - základní dynamická únosnost ložiska [N] (z katalogu ložisek)

P - zatížení ložiska [N]

p - exponent typu ložiska (kuličkové = 3, ostatní = 3,333).

Označení L_{10} se používá, jelikož se hodnota C udává v katalozích ložisek obvykle pro pravděpodobnost poruchy $H = 10 \%$.

Praktičtější údajem je však životnost ložiska v provozních hodinách, takže vzorec (4) upravíme:

$$L_{10,h} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (3.5)$$

kde n - otáčky ložiska [min^{-1}]

Výpočet ekvivalentního zatížení z provozního spektra

Ložisko je zatíženo v k různých provozních režimech a to tak, že:

pod zatížením P_1 vykoná L_{n1} otáček, pod zatížením P_2 vykoná L_{n2} otáček, až pod zatížením P_k vykoná L_{nk} otáček. Pak platí, že ekvivalentní zatížení:

$$P_{ekv} = \sqrt[q]{\frac{L_{n,1} \cdot P_1^q + L_{n,2} \cdot P_2^q + \dots + L_{n,k} \cdot P_k^q}{L_{n,1} + L_{n,2} + \dots + L_{n,k}}} \quad (3.6)$$

nebo jinak:

$$P_{ekv} = \sqrt[q]{\frac{\sum_{i=1}^k L_{n,i} \cdot P_i^q}{\sum_{i=1}^k L_{n,i}}} \quad (3.7)$$

a tato hodnota se použije místo hodnoty P ve vzorci (4) resp. (5).

V případě, že provozní režim a tedy i počty otáček jsou dány v procentech $Z_{n,1} \dots Z_{n,k}$ celkové provozní doby (např. $Z_{n,1} = 20 \%$, $Z_{n,2} = 60 \%$ a $Z_{n,3} = 20 \%$), pak se výraz (4) mění na:

$$P_{ekv} = \sqrt[q]{\frac{\sum_{i=1}^k Z_{n,i} \cdot P_i^q}{100}} \quad (3.8)$$

a v případě, že se provozní režim udává v podílech (např. $Z_{n,1} = 0,2$, $Z_{n,2} = 0,6$ a $Z_{n,3} = 0,2$)

$$P_{ekv} = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^k Z_{n,i} \cdot P_i^q} \quad (3.9)$$

Počítáme-li životnost ložiska v provozních hodinách (podle vztahu 2), je nutno spočítat i ekvivalentní otáčky podle vztahu:

$$n_{ekv} = \frac{\sum_{i=1}^k Z_{n,i} \cdot n_i}{100}$$

je-li $Z_{n,i}$ zadáno v % (viz vztah (8)) (3.10)

nebo

$$n_{ekv} = \sum_{i=1}^k Z_{n,i} \cdot n_i \quad (3.11)$$

je-li $Z_{n,i}$ zadáno v podílech (viz vztah (9))

Ekvivalentní zatížení z axiálního i radiálního zatížení ložiska

Pokud dojde k zatížení ložiska radiálně F_r i axiálně F_a , je nutno vypočítat ekvivalentní zatížení P_e podle vztahu:

$$P_e = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3.12)$$

Hodnoty X a Y získáme z katalogu ložisek.

Modifikovaný vztah pro výpočet trvanlivosti

Předchozí vztahy se použijí pro následující předpoklady:

- pravděpodobnost poruchy $H = 10 \%$
- ideální provozní podmínky (ideální mazání a chlazení)

Pokud toto není splněno, použije se pro výpočet upravené trvanlivosti vztah:

$$L_{n,a} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10} \quad (3.13)$$

kde

- a_1 - součinitel pravděpodobnosti havárie ložiska
- a_2 - součinitel materiálu,
- a_3 - součinitel provozních podmínek.

Vzhledem k vzájemné závislosti koeficientů a_2 a a_3 vytvořila firma SKF (a zavedla v normě DIN ISO 281) koeficient a_{23} označovaný i a_{SKF} . Tudíž je vztah (10) používán ve tvaru:

$$L_{n,a} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10} \quad \text{nebo} \quad L_{n,a} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot L_{10} \quad (3.14)$$

Tab. 1 Součinitel pravděpodobnosti havárie ložiska a_1

Pravděpodobnost havárie [%]	10	5	4	3	2	1
Označení trvanlivosti	L_{10}	L_5	L_4	L_3	L_2	L_1
Součinitel a_1	1,00	0,65	0,53	0,44	0,33	0,21

Součinitel a_{23}

Tento součinitel zahrnuje vliv

- ♦ materiálu komponentů ložiska,
- ♦ typu ložiska,
- ♦ zatížení,

- ♦ provozní teploty,
- ♦ čistoty maziva.

2.1.3 Příčiny opotřebení ložisek

Životnost ložiska je ovlivněna následujícími faktory:

- ♦ špatná volba maziva,
- ♦ nesprávná volba ložiska,
- ♦ vadná montáž,
- ♦ nečistoty,
- ♦ velké zatížení
- ♦ apod.

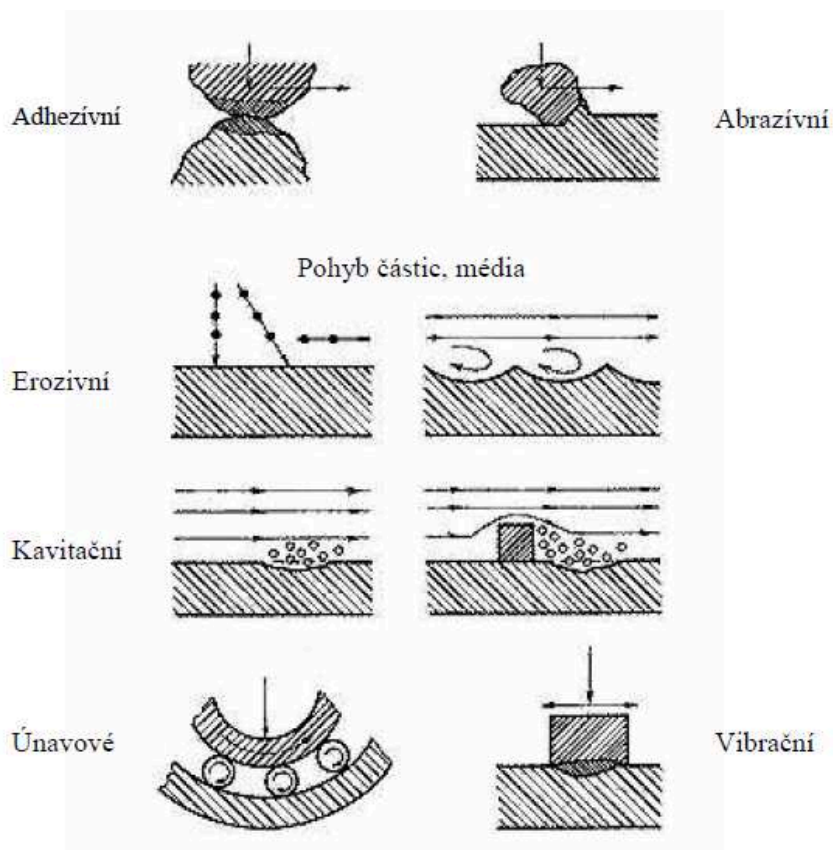
V případě ložisek jde o vzájemné odvalování či klouzání dvou těles a dochází tedy i k jejich znehodnocování opotřebením. Obecně se jedná o poškození únavové nebo o opotřebení povrchů oběžných ploch a valivých tělísek. Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, jenž opotřebení vyvolává.

V některých případech je nutno v obecném pojmu rozlišovat, o jaký druh opotřebení se jedná[3].

Mechanické opotřebení [1]

- ♦ adhezivní – charakterizujeme jako oddělování a přemísťování částic materiálu ložiskových těles. Dochází ke kovovému styku odvalujících se nebo třecích těles,
- ♦ abrazivní – charakterizujeme oddělováním částic z kluzných ploch ložisek řezáním nebo rýhováním volných tvrdých částí, a to buď ze samotných ložisek, popřípadě z okolního prostředí, anebo jsou tyto částice produktem dějů v ložisku (strusky, atd.),
- ♦ vibrační – charakterizujeme oddělováním částice malými vzájemnými oscilujícími posuvy stykových povrchů při normálním zatížení,
- ♦ odloupávání povrchů (pitting) – cyklické namáhání oběžných ploch kroužků u valivých ložisek má za následek únavu materiálu což se projeví vznikem trhlinek a vydrolováním materiálu z povrchové vrstvy,

- ♦ erozivní opotřebení je oddělování částic a poškozování součástí částicemi nesenými v proudu vzduchu nebo kapaliny,
- ♦ kavitační opotřebení je oddělování částic v důsledku kavitačních procesů v látkách v kapalném stavu,
- ♦ únavové – charakterizujeme jako cyklické kontaktní namáhání součástí, kolísání smykových napětí, vznik jamek.



Obr. 3 Schéma mechanického opotřebení [26]

Elektrické opotřebení ložisek jako souhrn čistě elektrického a elektroerozivního [3]:

- ♦ Čistě elektrické opotřebení – tímto pojmem budeme označovat opotřebení vznikající neustálým průchodem elektrického proudu ložiskem. To je umožněno trvalým stykem kroužků a valivých tělísek. Styková místa jsou tvořena jednotlivými malými ploškami. K tomu může docházet např. při velkém mechanickém přetížení ložisek. Toto opotřebení nezahrnuje opotřebení vzniklé elektroerozivními a elektrolytickými ději.
- ♦ Elektroerozivní opotřebení je opotřebení způsobené jiskrovými případně obloukovými výboji. Přitom je bezvýznamné, zda jiskření či elektrické oblouky vznikly vlivem velkého napětí, špatným mechanickým či elektrickým stavem

stroje apod. Jiskřením bude znehodnocováno i mazivo, čímž dojde k narušení jeho mazacích vlastností.

Ložiskové proudy [27]

Nejčastější příčinou vzniku ložiskových proudů je asymetrie v magnetickém obvodu stroje. Asymetrie vzniká z důsledku konstrukčního a nesprávného nastavení vůlí při konstrukci.

V ideálním případě magnetický tok prochází ze statorového vinutí přes vzduchovou mezeru stroje do rotoru.

Za normálních podmínek se pole procházející vzduchovou mezerou rozdělí tak, že polovina jde ve směru hodinových ručiček a druhá polovina proti. Pokud se vyskytne rozdíl v reluktanci v jednom nebo druhém směru, pak nastane nerovné rozdělení toku a objeví se tok, který se bude uzavírat přes hřídel, ložiska a kostru motoru.

Jednou z dalších příčin vzniku ložiskových proudů u větších motorů může být homopolární tok mezi statorem, rotorem a hřídelí. V neposlední řadě je možné do kategorie výrobních asymetrií zařadit i typ samotných ložisek a jejich maziv. Mezi standardní provedení ložisek patří kuličková a valivá ložiska pro indukční motory. Co se týká lubrikantů, tak mezi hlavní vlastnosti maziv by mělo patřit snížení tření mezi prvky ložiska, odvod tepla generovaného uvnitř ložiska a ochrana leštěných ploch ložisek proti prachu a znečištění. V některých případech může lubrikant sloužit i pro přerušení cesty proudu skrz ložisko.

Ložiskovým proudům zabráníme, pokud je motor a zátěž v souladu, dále důležitá je instalace zařízení.

2.2 Pohon

Pohon obvykle transformuje energii elektrickou na mechanickou.

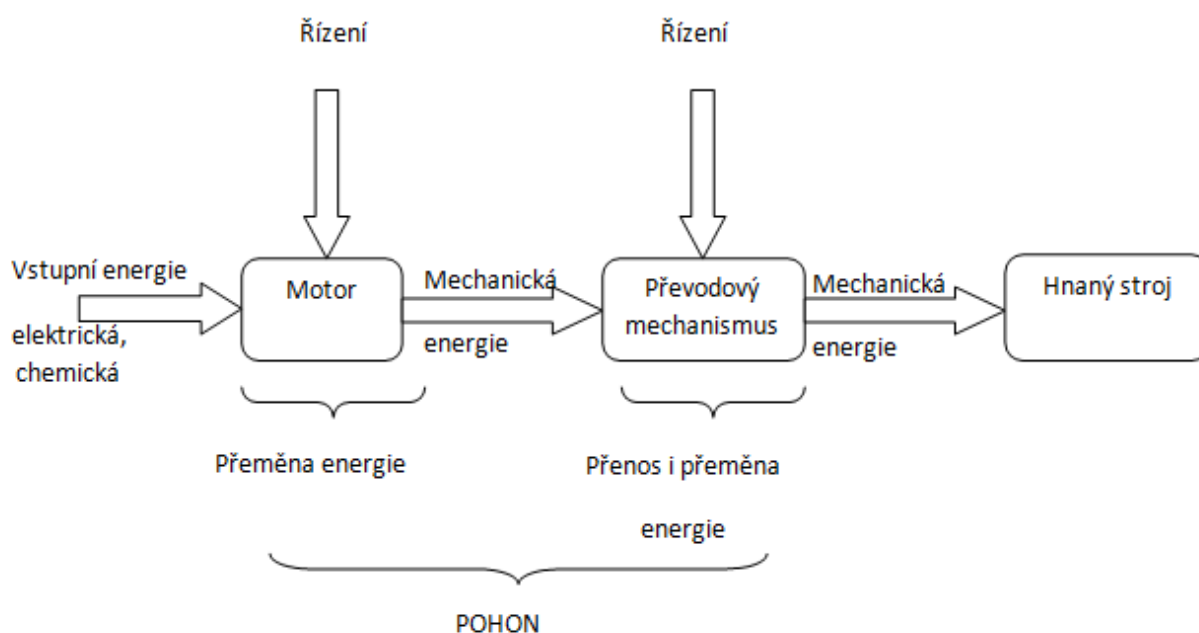
2.2.1 Podle jednotlivých pracovních mechanismů může být pohon určen:

- ◆ k realizaci kinematiky pracovního mechanismu bez nároků na silový přenos,
- ◆ k realizaci silového přenosu v pracovním mechanismu bez nároků na kinematické vazby,
- ◆ k realizaci kombinovaného přenosu s požadavkem jak na kinematiku, tak i na silový přenos v pracovním mechanismu. [5]

2.2.2 Dle pohybu výstupního členu pracovního mechanismu rozlišujeme pohony:

- ♦ s rotačním výstupem,
- ♦ s přímočarým výstupem,
- ♦ s kývavým výstupem. [5]

2.2.3 Skladba pohonu



Obr. 4 Skladba pohonu [5]

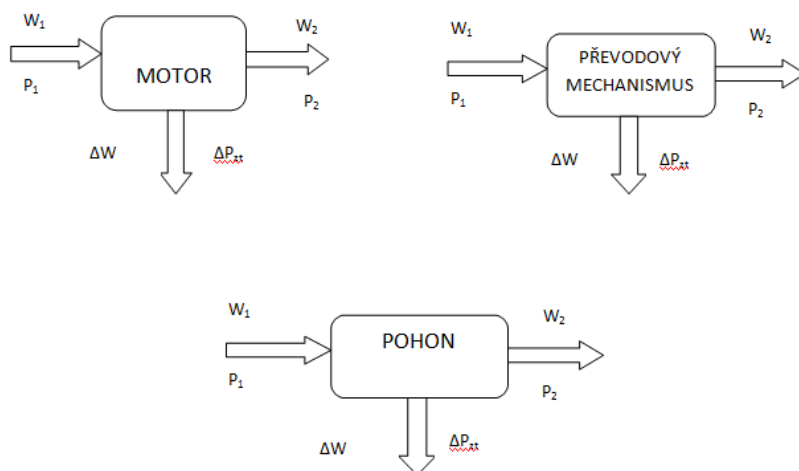
2.2.4 Přenos a přeměna energie v pohonu

Část energie, vstupující do mechanismu, se nebude podílet na realizaci technologického procesu, k němuž je mechanismus určen, ale využije se k překonání odporů. Tyto, z hlediska teorie mechanismů, můžeme klasifikovat jako odpory proti pohybu, proti deformaci a odpory proti zrychlení[5].

Charakter změn je nevratný, jak je tomu u odporů proti pohybu, kde dochází k přeměně energie teplotou, nebo vratný, jak je tomu u odporů proti deformaci a odporů proti zrychlení, kde dochází k přeměně na energii deformační či kinetickou, která může mít akumulární charakter.

Obecně je přeměna a přenos energie v motoru či v celém pohonu dán poměrem výstupní energie W_2 a vstupní energie W_1 .

2.2.5 Přenos energie v pohonu



Obr. 5 Přenos a přeměna energie[5]

$$G_w = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_1 - \sum \Delta W}{W_1} = 1 - \frac{\sum \Delta W}{W_1}, \quad (3.15)$$

kde G_w – přenos energie [-]
 W_1 – energie na vstupu [J]
 W_2 – energie na výstupu [J]

kde suma ΔW značí součet všech energetických ztrát, tj. vratných i nevratných přeměn energie. Platnost vztahu je pro dynamický, tj. neustálý režim práce pohonu, u něhož se uplatňují všechny typy odporů, tedy i ty, jež se vyznačují časovými změnami $d(\Delta W/dt)$. Běžně se tyto úlohy řeší pro ustálené stavy nebo pro úzce vymezené okolí pracovních bodů charakteristik či pro přesně definované časové průběhy přenosu energie.

Pro ustálený stav se přeměna a přenos energie v pohonu G_w nazývá celková účinnost a je vyjádřena poměrem výstupního výkonu P_2 a vstupního výkonu (příkonu) P_1

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum \Delta P_{zt}}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta P_{zt}}{P_1}, \quad (3.16)$$

kde $\sum \Delta P_{zt}$ – součet všech ztrát výkon
 P_1 – vstupní výkon
 P_2 – výstupní výkon

η_c – celková účinnost

Obecně je celková účinnost dána součinem dílčích účinností η_i

$$\eta_c = \prod_i \eta_i, \quad (3.17)$$

kde η_c – celková účinnost

které mají význam energetický, nebo vztažený k přeměně energie a podle jednotlivých typů motorů je nazýváme např. účinnost indikovaná, termodynamická, ventilační, nebo význam mechanický, vytažený na moment otáčky, rychlost, tlak, průtok apod. [5].

2.2.6 Diagnostika pohonných jednotek

Jako pohonnou jednotku v klasickém provedení považujeme tzv. elektromotor, spojku, brzdu a převodovku. Pro vibrodiagnostiku používáme frekvenční nebo Fourierovu analýzu. Měření je neobjektivnější, pokud jej provedeme ve třech rovinách (vertikální, horizontální a axiální), čímž získáme dostatečný obraz o aktuálním stavu měřené pohonné jednotky v reálném čase. Z daných měření je možno přesně lokalizovat místo vznikajícího defektu na základně určení otáčkových frekvencí rotujících částí, dále ustanovit příčinu vznikajícího defektu jako je nesouosost, nevývaha apod. a na základě toho zjistit zbytkovou životnost. [7]

Diagnostika strojních skupin [7]

Diagnostické přístroje poskytují cenné diagnostické informace, ale požadují po obsluze značné zkušenosti. Ekonomický přínos nelze podceňovat!

Diagnostická technika se v současné době využívá nejvíce u větších celků, u nich často tvoří část trvalé instalace.

Diagnostika ložisek vzhledem k odlišnému konstrukčnímu uspořádání kluzných a valivých ložisek musíme rozdělit do dvou směrů, a to diagnostiku kluzných a diagnostiku valivých ložisek.

Kluzná ložiska by teoreticky měla mít nekonečnou životnost, jelikož v průběhu provozu je jejich opotřebení minimální. Výjimkou mohou být pouze výrobní poruchy, jež jsou vyvolány vnějšími silami (např. nevyvážení rotoru soustavy), nedostatečným mazáním apod. U valivých ložisek může být životnost ovlivněna únavou materiálu i bez přítomnosti nadměrných vnějších sil.

2.2.7 Diagnostika ložisek

Nejběžnější příčinou vzniku poruchy u kluzných ložisek je porušení olejového filmu.

Nejčastějšími příčinami poruch obecně jsou tyto:

◆ Porucha nevyvážením rotoru

Nejobvyklejší příčinou poruch ložisek jsou nadměrné síly vyvolané vibracemi při nevyvážení rotoru soustavy uložené v ložiskách. Tento typ poruchy lze určit z velikosti amplitudy ve frekvenčním spektru odpovídající frekvenci otáčení rotoru.

◆ Porucha vlivem nesouososti

Nesouosost hřídelů, které jsou spojeny tuhým nebo pružným spojením, téměř vždy vyvolává poruchu ložiska. Porucha ložiska se projeví ve vibračním spektru na frekvenční složce odpovídající dvounásobku otáčkové frekvence.

◆ Porucha vlivem nestability

Nestabilita nebo sklon k nestabilitě je poměrně běžný problém u vysoce rychloběžných strojů. Nejčastěji je nestabilita způsobena olejovými víry, jelikož má tlaková vlna cirkulující v olejovém filmu přibližně poloviční otáčkovou frekvenci. Ve frekvenčním spektru se tato porucha projeví tím, že jsou zdůrazněny frekvenční složky přibližně mezi 40% a 60% otáčkové frekvence, přičemž jejich amplituda kolísá. Pro průběh zobrazení pohybu hřídele jsou typické dvě časové značky na obvodu oběžné dráhy hřídele.

◆ Porucha elektrický výbojem

Tento typ poruchy je vyvolán zavedením statické elektřiny na zmagnetizovaný rotor procházející vlhkým prostředím. Při dosažení určitého potenciálu vůči zemi projde výboj statické elektřiny mezi ložiskem a jeho pouzdrem. Výboj způsobí porušení ložiskové výstelky, které v krajním případě povede až k mikropittingům. Odhalení této poruchy měřením je obtížné. K jejich zjištění se využívá metody analýzy oleje na otěrové kovy. [7]

2.3 Spojky a převody

Mezi diagnostikované strojní skupiny s rotačním pohybem patří spojky a převodovky. Převážná většina používaných metod je zaměřena na vyhodnocování vibroakustických signálů

snímaných z vhodně zvolených měřicích míst sledovaného objektu. Nejjednodušší diagnostická metoda se opírá o výsledky měření charakteristických parametrů vibrací, a to o jejich celkovou úroveň v širokém frekvenčním pásmu. Celková hladina vibrací snímaná výchylkou, rychlostí, resp. zrychlením, je velmi užitečnou diagnostickou veličinou, která udává pouze celkový technický stav stroje. Pro lokalizaci poruch, resp. sledování jejího vývoje v čase, se řadí mezi neúčinnější metody spektrální analýzy.

Pro přesné spektrální charakteristiky signálu je nutné rozdělit celý frekvenční rozsah, který nás zajímá, na úzká pásma. Jednotlivá pásma mohou mít stálou šířku přes celý měřený frekvenční rozsah, anebo se šířka pásma může měnit se střední frekvencí. [7]

3 Cíle disertační práce

V podvědomí většiny techniků dosud přežívá názor, že teplota ložisek točivých strojů vzrůstá s vzrůstem vibrací, který nebyl teoreticky ani prakticky dokázán. Hlavním cílem disertační práce je tedy laboratorní ověření vzájemné interakce těchto fyzikálních veličin, což by potvrdilo nebo vyvrátilo uvedený názor. Objektivní zjištění umožní v provozních podmínkách sledovat parametry strojů in situ, na jejichž základě by se mohla hodnotit bezpečnost a spolehlivost průmyslových strojů a jejich komponent.

Pro dosažení cílů této disertační práce je stanoven tento postup řešení:

- ◆ analýza současného stavu diagnostiky,
- ◆ sestavení modelu pro experimentální měření,
- ◆ návrh měřicího systému,
- ◆ návrh systému měření provozních parametrů experimentálního modelu,
- ◆ měření vibračních účinků vybuzených uměle vytvořenou závadou na experimentálním modelu,
- ◆ měření teploty na experimentálním modelu,
- ◆ analýza získaných výsledků z dílčích cílů disertační práce, její porovnání se současným stavem, formulování závěrů a doporučení pro praxi.

Předpokládaným přínosem bude dokonalejší poznání interakce teploty a vibrací na komponentách točivých strojů.

4 Zásady pro navržení měřicího systému

Pro zpracování disertační práce byl navržen měřicí systém, do kterého bylo nutné zahrnout:

Měření - soubor činností, jejichž cílem je stanovit hodnotu veličiny

Proces měření - soubor úkonů ke stanovení hodnoty měřené veličiny, popř. soubor operací určujících hodnotu veličin.

Pokud řekneme měření, myslíme vše, co je třeba udělat proto, abychom na ukazateli měřidla (v našem případě infračervené termografické kamery, měřicího dotykového teploměru a analyzátoru vibrací) získali spolehlivou informaci. Spadá sem příprava a kontrola měřicího přístroje či měřidla, montáž snímače, nastavení a kalibrace a samotné sejmутí a zpracování signálu.

Měřicí přístroj – zařízení určené k měření.

Měřicí zařízení – jedná se o měřicí přístroj, software, etalon, referenční materiál, pomocný přístroj nebo jejich kombinace, jež jsou nezbytné k realizaci procesu měření.

Měřicím zařízením tedy nazýváme řetězec složený ze snímače (měřicího doteku), případně dalšího příslušenství, a bloku zpracování a zobrazení výsledné hodnoty. Dále může pod měřicí přístroj spadat i počítač včetně softwaru, pokud jsou nedílnou součástí měřicího řetězce.

Výsledek měření – hodnota přiřčená určité měřené veličině, k níž se dospělo měřením. Změřená hodnota je ovlivněna systematickými a náhodnými účinky, které společně určují chybu měření. Tato hodnota je údaj odečtený z displeje měřidla, jenž je dán pravou hodnotou měřeného rozměru a okamžitou velikostí chyb měření.

Měření – těsnost souhlasu mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny.

Přesnost je metrologický pojem, jehož číselnou mírou je chyba měření. Udává rozdíl mezi skutečně naměřenými a předpokládanými hodnotami.

Citlivost – podíl změny výstupního signálu měřicího přístroje a odpovídající změny vstupního signálu.

Citlivost udává minimální změny měřené hodnoty, kterou je měřidlo schopno indikovat. Citlivost má vztah k rozlišitelnosti měřidla, ale nelze tyto termíny zaměňovat.

Systém a proces měření - současnými technickými prostředky, metodickými nástroji a časovým prostorem nejsme schopni stanovit pravou hodnotu měřené veličiny. Proto musí být stanoven interval, v němž se pravá hodnota s definovanou pravděpodobností nachází. Pro splnění tohoto cíle musí být definován systém zdrojů variability a vzájemných vazeb,

ve kterých naměřená hodnota vzniká. Soubor operací určující hodnotu veličin tvoří *proces měření*.

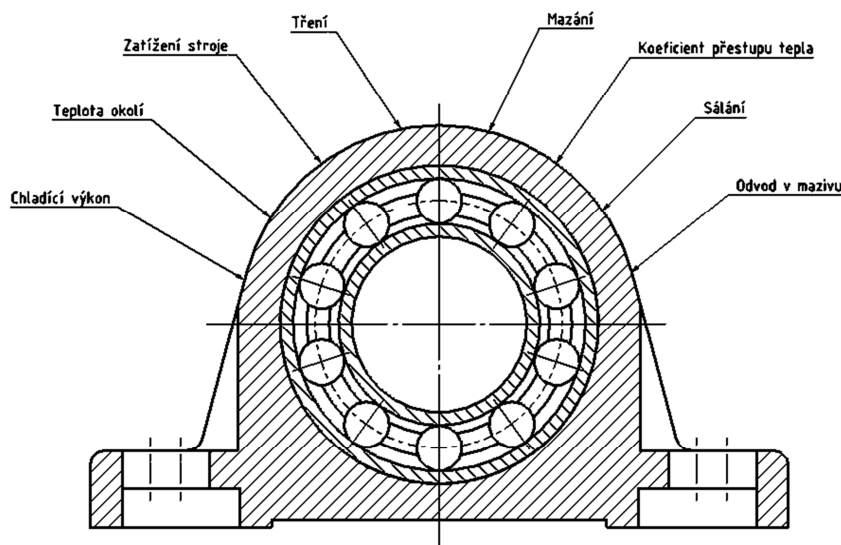
Systém měření tvoří jeden ze zdrojů procesu, během něhož vzniká výsledek měření. Systém měření tvoří vnitřní části, jež jsou navzájem provázané, ovlivňují se a jsou hlavními zdroji variability. Tvoří jej především:

Operátor – člověk provádějící měření a pravidelné vyhodnocení, za které nese zodpovědnost. Tvoří živou část systému měření. [8]

4.1 Vznik a šíření tepla a vibrací rotačních strojů

Teplota je jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty, a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Existuje jen velmi málo vlastností látek, které by nebyly teplotně závislé. Ve své podstatě je teplota mírou kinetické energie pohybu molekul a atomů, přičemž molekuly na sebe navzájem narážejí a rychlost jejich pohybu se stále mění v čase. Pokud na hmotu nepůsobí okolní prostředí, průměrná rychlost pohybu molekul je konstantní. Tato průměrná rychlost závisí na teplotě. Termodynamická teplota libovolného tělesa je přímo úměrná kinematické energii molekul, tzn. jejich hmotnosti a kvadrátu rychlosti pohybu. Za nejnižší teplotu se pokládá absolutní teplotní nula neboli nula termodynamické stupnice (0°K), během níž veškerý pohyb ustává. Pro stanovení teploty se používá teplotní závislosti jejich fyzikálních veličin. Volí se takové fyzikální jevy, u nichž lze závislost veličiny matematicky vyjádřit teplotní stupnicí. [34]

Vznik teplot a vibrací můžeme deklarovat na příkladu valivého ložiska. Valivé ložisko tvoří klasický třecí uzel, v němž vzniká teplo, a které přenáší většinu vibračních složek z rotačních částí elektromotoru na stator. Na toto ložisko tedy působí několik faktorů, jak ukazuje obrázek 6.



Obr. 6 Ložiskový domek

Mezi tyto faktory patří především vliv maziva a mazání, provozního zatížení, míry opotřebení, vliv okolního prostředí, vliv vnitřního prostředí stroje, vliv statického a dynamického zatížení.

Pokud budeme chápat ložisko jako součást, kde platí určitá energetická bilance pro provozní stav ložiska, tj. pro ustálené hodnoty provozní teploty a provozních vibrací, musí platit rovnováha mezi celkovou energií vydanou ložiskem a celkovou energií přijatou do ložiska. Pro energetickou tepelnou bilanci ložiska platí, že provozní teplota ložiska je dána rozdílem tepla vzniklého v ložisku a tepla, které ložisko přijímá ze svého bezprostředního a okolního prostředí. Teplo vzniklé v ložisku je převážně dáno třecími procesy mezi valivými tělisky a kroužky ložiska, třením kovových částí ložiska s mazivem a také dynamickými účinky působícími v ložiscích čili vibracemi.

Pro teplo vyzařované na povrchu ložiskového štítu tedy můžeme sestavit energetickou bilanci ve tvaru:

$$Q_p = Q_T + Q_D + Q_S + Q_E - Q_V - Q_O - Q_M \quad (4.1)$$

- kde
- Q_p – teplo na povrchu ložiskového štítu,
 - Q_T – teplo vzniklé třecími procesy,
 - Q_D – teplo vzniklé dynamickými účinky v ložisku,
 - Q_E – teplo přijaté ložiskem z ostatních částí elektromotoru,
 - Q_S – teplo vzniklé statickými účinky v ložisku,
 - Q_V – teplo ztracené vedením,

Q_O – teplo odebrané okolím,

Q_M – teplo odebrané mazivem,

Z výše uvedeného vztahu plyne, jak náročné je posoudit jaké množství tepla je způsobeno právě vibracemi přenášenými do ložisek, pokud nejsou známy ostatní teplotní zdroje a spády. Teplotní ohřev, který souvisí čistě s vibracemi, je dán složkou Q_T charakterizující vznik vibrací ve vyšších spektrálních oblastech a složkou Q_D popisující naopak vznik tepla na základě existence nízkofrekvenčních dynamických dějů v ložisku. Největší podíl na vzniku tepla mají třecí účinky, což jsou účinky vyskytující se ve vysokofrekvenčním spektru (špatné mazání, opotřebení valivých ploch ložiska, případně znečištěné mazivo). Oproti tomu teplo způsobené dynamickými účinky u dobrého ložiska je menší, neboť se vyskytují na nižších frekvencích. Při postupně se rozvíjejících vadách v ložiscích dochází k progresivnímu nárůstu těchto složek a ke vzniku nadměrného oteplení.

Vedení tepla [8]

Dvě rovinné desky o stejné tloušťce δ , na konstantních teplotách t_1 a t_2 ($t_1 > t_2$), vznikne po jisté době rovnovážný stav, při kterém prostupuje teplo deskou z povrchu vyšší teploty t_1 k povrchu nižší teploty t_2 .

Teplo Q , které projde za dobu τ plochou S , je podle zkušenosti přím úměrné velikosti plochy S , teplotnímu rozdílu $(t_1 - t_2)$ a době τ a nepřímo úměrné tloušťce desky δ

$$Q = \lambda S \tau \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (4.2)$$

kde Q – teplo
 τ – čas
 δ – tloušťka desky
 $(t_1 - t_2)$ – teplotní rozdíl

Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje schopnost látek vést teplo a podle jeho velikosti dělíme látky na dobře a špatně vodivé. Velmi dobrými vodiči tepla jsou kovy, jež řadíme taktéž mezi dobré vodiče elektrického proudu.

Teplotní roztažnost není vždy žádoucí, avšak existují případy, u nichž se právě teplotní roztažnosti využívá.

Teploměry a termostaty bývají založeny na rozdílech v teplotní roztažnosti mezi dvěma kovy, tvořícími bimetalový proužek.

Objemová roztažnost

Vzrostou-li při zahřátí všechny rozměry tělesa, musí vždy vzrůst i jeho objem. Pro tekutiny je objemová roztažnost jediný rozumný parametr k měření teplotní roztažnosti. Zvýší-li se teplota pevné látky nebo tekutiny objemu V o hodnotu ΔT , bude přírůstek objemu $\Delta V = V\beta \Delta T$, kde β je teplotní součinitel objemové roztažnosti materiálu. Součinitele objemové a délkové roztažnosti pevných látek jsou spojeny vztahem $\beta = 3\alpha$.

Tepelné detektory

Vyznačují se tím, že dopadající vstupní záření je pohlcováno jeho aktivní plochou, čímž dochází ke zvýšení teploty. Výstupní signál tepelných detektorů je proto v principu téměř nezávislý na vlnové délce dopadajícího záření, tj. neselektivní. Povrch detektoru má pro různé vlnové délky rozdílnou absorpci, tedy nelze dosáhnout absolutní neselektivnosti.

Teplotní změny jsou pomalý proces, proto časová konstanta tepelného detektoru je zpravidla o několik řádů větší než u fotodetektoru.

U tepelných detektorů obecně bývá relativně vysoká citlivost daná širokým absorbovaným spektrem a velkým poměrem signál – šum, vyvolaným velkými teplotními změnami citlivého elementu dopadajícím zářivým tokem.

Teplotu detektoru nelze měřit přímo, z toho důvodu se převádí na jinou veličinu pomocí převodníků.

- a) Termoelektrické detektory – využívají změnu termoelektrického napětí dvojice vodičů vlivem rozdílu teplot mezi měřicím spojem a srovnávacím spojem.
- b) Bolometry – využívají změnu elektrického odporu elementu detektoru na základní změny jeho teploty.
- c) Pyroelektrické detektory – využívají teplotní změnu elektrostatické polarizace.

Teplota a její měření

Podle Carnotovy věty je účinnost vratných cyklů pracujících mezi teplotami T a T_0 nezávislá na druhu pracovní látky. Této skutečnosti je využito k definici teplotní stupnice

$$\eta = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T} \Rightarrow \frac{Q}{Q_0} = \frac{T}{T_0} \quad (4.3)$$

kde η – účinnost
 T – teplota
 T_0 – teplota okolí

Modely záření – v roce 1900 dospěl Max Planck ke kvantové hypotéze, kdy záření o kmitočtu ν může emitovat nebo se pohlcovat pouze v celistvých kvantech o velikosti

$$\varepsilon = h \cdot \nu \quad (4.4)$$

kde h – Planckova konstanta.

Závěr Planckovy hypotézy je, že tělesa mohou vyzařovat energii, jen po určitých kvantech rovných součinu ($h \cdot \nu$).

Fyzikální podstata záření je soubor fotonů, šířící se prostorem ve vakuu rychlostí světla c . Kmitočet záření potom definujeme jako

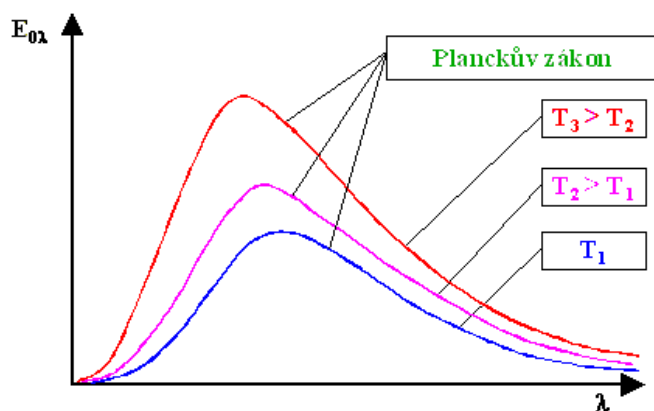
$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.5)$$

kde ν – kmitočet záření

c – rychlost elektromagnetického záření ve vakuu

λ – vlnová délka příslušná tomuto záření

Planckovým zákonem pro vyzařování černého tělesa byly vyřešeny nesrovnalosti mezi teorií a výsledky experimentů z oblasti teplotního záření. Při teplotním záření jde tedy o výměnu energie mezi tělesem a elektromagnetickým vlněním obr. 7.



Obr. 7 Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče[28]

Absorpce podle Plancka:

Záření, které dopadne na atom, předá mu svoji energii a převede ho skokem z nižší energetické hladiny do vyšší. Dopadající záření tím zaniká a projeví se zvýšením celkové energie atomu.

Pochod emise:

Přejde-li atom z vyšší energetické hladiny skokem do nižší, vyzaří se rozdíl obou energií ve formě elektromagnetického vlnění. Energie se tedy vyzařuje i pohlcuje v kvantech, která odpovídají rozdílům energetických hladin. Každému vyzařnému nebo pohlcenému kvantu přísluší určitá vlnová délka.

Pochody emise i absorpce jsou monochromatické. Spojité spektrum při vyzařování vzniká složením mnoha emisních pochodů.

Tepelné záření

Záření chápeme jako elektromagnetické vlnění, při němž se přenáší energie. Takové záření se nazývá tepelné.

Tepelné záření je emitováno povrchem všech těles, jejichž teplota je vyšší než 0K. Vyzařované spektrum je spojité, jako následek dějů v atomech a molekulách látek s vyzařovaným čárovým spektrem. Vyzařující těleso se skládá z molekul, ty se dále dělí na atomy, jež kmitají v silovém poli ostatních molekul a atomů, tzn. konají tepelný pohyb. Energie tohoto kmitavého pohybu se jednak přenáší na sousední částice, jednak přechází do okolního prostoru formou elektromagnetických vln.

Vyzařená energie jde na účet energie tepelného pohybu částic tělesa, a proto se vyzařováním těleso ochlazuje. Z hlediska jednotlivých atomů je pochod vyzařování nahodilým jevem, řídí se proto statistickými zákony. Tomu také odpovídá spojité vyzařované spektrum.

Lze konstatovat, že vyzařující povrch těles je složen z velkého počtu elementárních zářičů, z nichž se šíří zářivá energie do prostoru.

Přenos se děje rychlostí

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon \cdot \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}, [\text{m.s}^{-1}] \quad (4.6)$$

kde c - rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu
 ε_r - relativní permitivita prostředí
 μ_r - a relativní permeabilita prostředí

Energie se při elektromagnetickém vlnění přenáší tím směrem, jímž se vlnění šíří. Teplotní záření je náhodného charakteru, tudíž se nejedná o záření koherentní.

V termodynamické rovnováze je takové záření popsáno Kirchhoffovým vyzařovacím zákonem pro monochromatické záření

$$\frac{H_e(\lambda)}{\alpha(\lambda)} = f(T, \lambda) \quad (4.6)$$

kde $H_e(\lambda)$ – teplotní záření
 $\alpha(\lambda)$ – funkce teploty
 T – teplota
 λ – vlnová délka

Podíl spektrální hustoty intenzity vyzařování $H_e(\lambda)$ teplotního záření a spektrální pohltivosti $\alpha(\lambda)$ je funkcí teploty T , vlnové délky λ a není závislá na vlastnostech zářiče. Planckův vyzařovací zákon pro spektrální (monochromatickou) hustotu intenzity nepolarizovaného vyzařování černého tělesa ve tvaru

$$H_0(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{T \cdot \lambda}\right) - 1} \quad (4.7)$$

kde c_1 – první radiační konstanta
 c_2 – druhá radiační konstanta
 T – teplota
 λ – vlnová délka

Dle Planckova rozdělení je zářivost černého tělesa rozložena na jednotlivé vlnové délky nerovnoměrně, přičemž rozložení je funkcí termodynamické teploty tělesa T .

Veličina $H_0(T, \lambda)$ definuje spektrální hustotu intenzity vyzařování, jenž udává velikost plošného zářivého výkonu ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, který připadá na jednotkový interval vlnových délek $d\lambda$.

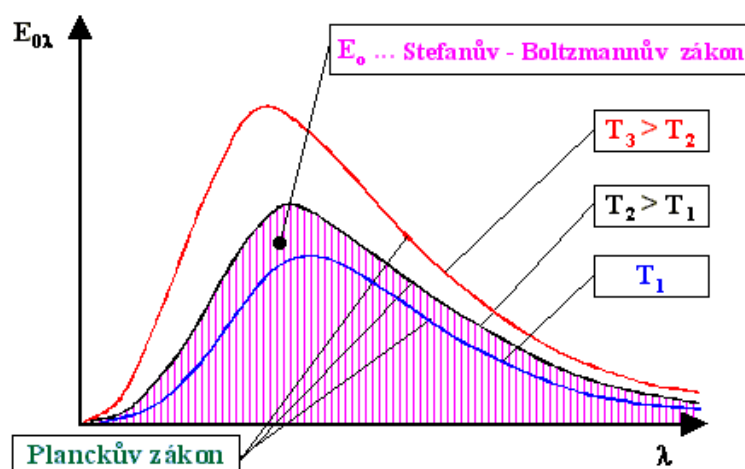
Celkovou intenzitu vyzařování černým tělesem v rozsahu vlnových délek $\lambda \in (0 \text{ až } \infty)$ udává Stefan-Boltzmannův zákon obr. 8.

$$H_0(T) = \int_0^\infty H_0(T, \lambda) \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4, \quad (4.8)$$

kde

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta

$H_0(T, \lambda)$ - spektrální hustota intenzity vyzařování

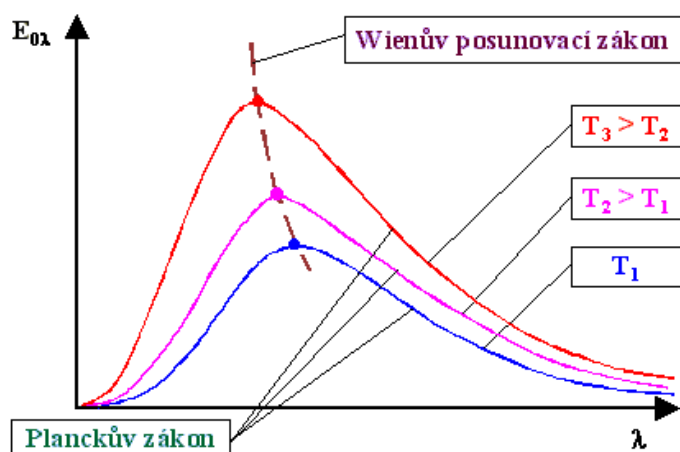


Obr. 8 Zobrazení Stefanova – Boltzmannova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření[29]

Pro maximální hodnotu spektrální intenzity vyzařování platí tzv. Wienův zákon posuvu, jehož zobrazení je na obr. 9.

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 = \text{konst.} [\mu\text{m.K}] \quad (4.9)$$

Vyplývá z něho, že s rostoucí teplotou zářiče se maximum spektrální emise posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám.



Obr. 9 Zobrazení Wienova posunovacího zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření[30]

Metody bezdotykového měření teploty

Bezdotykové, též radiační měření teplot zpracovává tepelné záření vysílané částí povrchu měřeného objektu. Měronosnou veličinou je intenzita záření nebo poměr intenzit.

Tření

Třením definujeme jev, jenž vzniká při pohybu tělesa v těsném kontaktu s jiným tělesem. Většinou dochází ke tření mezi pevnými, kapalnými nebo plynnými tělesy. Pro každé tření existuje třecí síla, která působí proti pohybu.

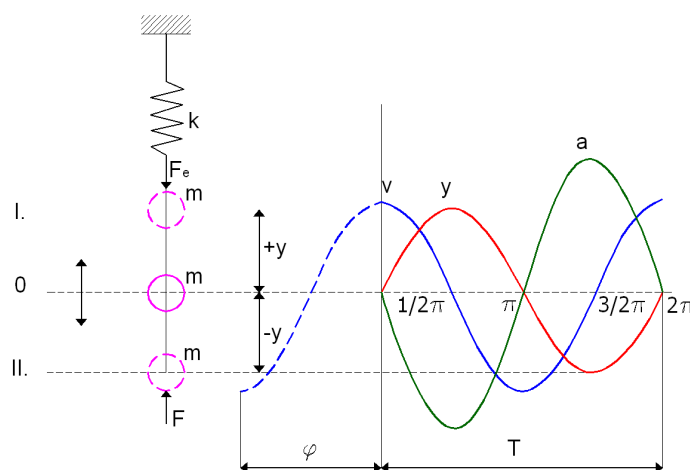
4.1.1 Vibrace u rotačních strojů

Vibrace jsou kmitavými pohyby povrchů těles. Každý kmitavý pohyb je možné charakterizovat třemi veličinami, a to amplitudou A , periodou T respektive frekvencí f případně úhlovou frekvencí ω a fází φ . Tyto tři parametry plně charakterizují kmitavý pohyb. [14]

4.1.2 Základní principy vzniku chvění

Vznik chvění lze vysvětlit na hmotném bodě P pověšeném na pružině, která je pevně uchycena na jednom konci. Pohyb takového hmotného bodu je způsoben pružnou silou, tj. silou vznikající pružností jakéhosi prostředí (tělesa) při jeho deformaci.

Takhle se brání pružné těleso proti změně tvaru. Jedná se o reakci na vnější sílu působící deformaci tělesa. Tato pružná síla se snaží uvést deformované těleso do původního stavu. [14]



Obr. 10 Popis kmitavého pohybu hmotného bodu

Byla-li pružina vnější silou stlačena, snaží se jí pružná síla roztáhnout na původní délku. Hmotný bod upevněný na volném konci pružiny se nachází v klidu, v rovnovážné poloze nula, pokud na něj nepůsobí žádná vnější síla. Jestliže považujeme pružinu (těleso)

za dokonale pružnou, řídí se pružná síla F_e Hookovým zákonem, přičemž je přímo úměrná výchylce y volného konce pružiny a mající opačný směr než tato výchylka. Pak je definována

$$F_e = -yK \quad (4.10)$$

kde F_e – pružná síla
 K – tuhost pružiny
 y – výchylka

Setkáváme se se silami, které nejsou způsobeny pružností tělesa, mají však podobný charakter a chovají se jako pružná síla. Jedná se o kvasielastické síly, jenž rovněž způsobují kmitavý pohyb.

Jestliže se vychýlí hmotný bod z rovnovážné polohy nula, bude se pohybovat směrem k ní zrychleným pohybem a setrvačností přejde na opačnou stranu klidové polohy a vzdálí se od ní. Účinkem pružné síly je pohyb zpožděný, zpomalující se. Poté opět pružná síla vrátí hmotný bod k rovnovážné poloze z druhé strany, klidovou polohou opět setrvačností přejde až do místa původního vychýlení. Uvedený pohyb hmotného bodu okolo rovnovážné polohy se opakuje, jedná se o kmitavý nebo harmonický pohyb, jak je vidět na obr. 10. Jeho průběh závisí jednak na setrvačných vlastnostech hmotného bodu a jednak na vlastnostech pružiny.

$$F_e = ma \quad (4.11)$$

Jestliže uvažujeme ztráty energie v pružině a tření tělesa m , bude kmitání tlumené a v pohybové rovnici se objeví další členy.

Během pohybu v uvažovaném příkladu nepůsobí po celou dobu pohybu žádné síly, které by zakřivovaly dráhu pohybu. Lze tedy nazvat popsáný kmitavý pohyb, pohybem přímočarým.

Počet kmitů, jenž vykoná hmotný bod za jednotku času, udává kmitočet f (frekvence)

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.12)$$

kde T – doba jednoho kmitu.
 f – kmitočet Hz [s^{-1}].

Často bývá udáván kmitočet místo f veličinou ω , která je 2π násobkem kmitočtu.

$$\omega = 2\pi f \quad (4.12)$$

kde ω – úhlový kmitočet nebo kruhová frekvence.

Průběh jednoduchého kmitavého pohybu je určen amplitudou výchylky Y a kmitočtem f . Hmota velikosti na pružině tvoří kmitavý systém, který kmitá vždy stejným kmitočtem, nezávisle na amplitudě výchylky. Tento kmitočet nazýváme vlastním kmitočtem soustavy nebo kmitočtem rezonančním.

Položíme rovnici

$$\frac{K}{m} = \omega^2 \quad (4.13)$$

pak je

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (4.14)$$

Tato diferenciální rovnice druhého řádu, lineární, homogenní s konstantními koeficienty a bez členu s první derivací má řešení

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.15)$$

kde Y a φ jsou integrační konstanty. Argument $(\omega t + \varphi)$ je fází harmonického pohybu.

Rychlost kmitavého pohybu stanovíme derivováním průběhu výchylky y podle času:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega Y \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.16)$$

Kmitavý pohyb popsaný rovnicí (3.9) probíhá určitou rychlostí v , kterou označujeme obvykle jako rychlost kmitání. Amplituda rychlosti kmitavého pohybu je

$$V = \omega Y = 2\pi f Y \quad (4.17)$$

Zrychlení kmitavého pohybu bude

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.18)$$

a jeho amplituda

$$A = \omega^2 Y \quad (4.19)$$

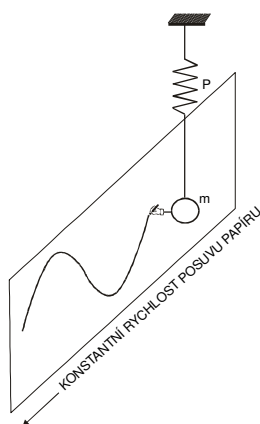
Analýza signálů buzených chvěním [14]

Analýzu signálů buzených chvěním můžeme vyhodnotit třemi způsoby:

- ♦ modální,
- ♦ časové,
- ♦ frekvenční.

Časová oblast [14]

V téhle oblasti je již signál pozorován a popsán. Na základě měření nebo pozorování je možné zjistit stavy nebo změny v pozorovaném objektu, jež probíhají v časové závislosti.

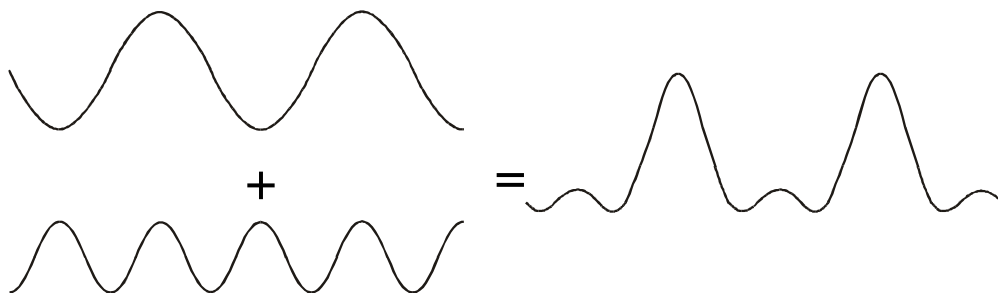


Obr. 11 Přímý zápis výchylky v časové oblasti

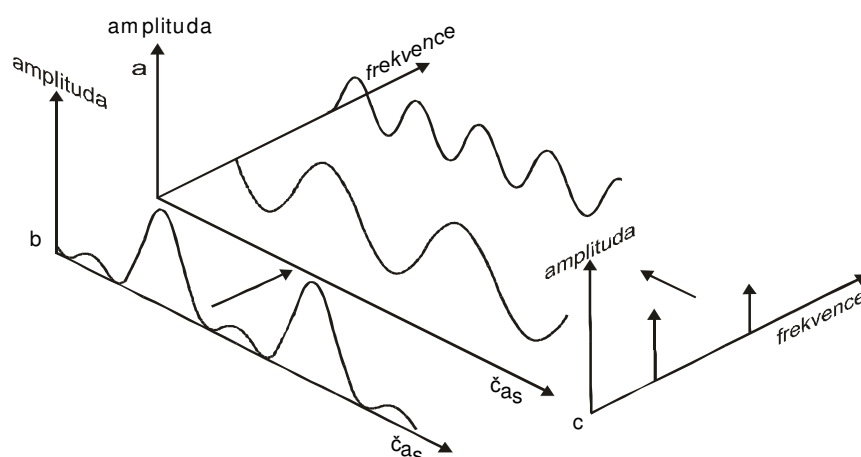
Na obr. 11 je zobrazena jednoduchá mechanická soustava o jednom stupni volnosti, ve které chvějící se hmota m je vybavená prostým zapisovačem. Zapisovač může zaznamenávat okamžitou polohu hmoty na papírovém pásku, jenž se pohybuje se známou a konstantní rychlostí. Tento zápis je zápisem výchylky ve funkci času [14].

Frekvenční oblast [14]

Z Fourierovy transformace je známo, že každý signál je složen z několika harmonických složek s různými kmitočty jak je vidět na obr. 12. Vhodným výběrem amplitud, frekvencí a fází těchto složek je možné získat identický průběh s průběhem původním.



Obr. 12 Signál, který vznikl v důsledku součtu dvou harmonických signálů



Obr. 13 Závislosti mezi časovou a frekvenční oblastí

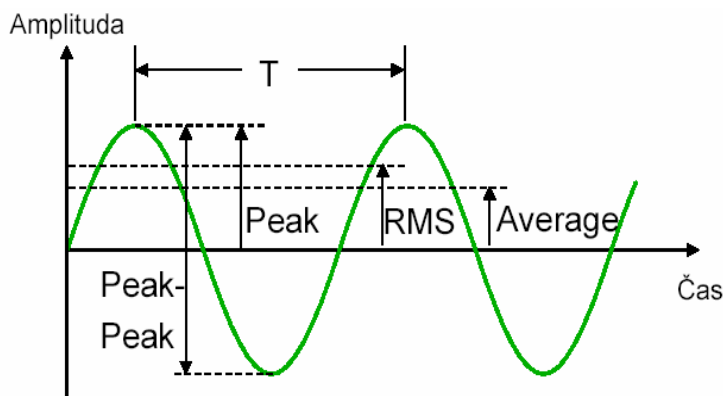
- a) průběh frekvenční oblasti
- b) průběh v časové oblasti
- c) průběh ve frekvenční oblasti

Na obr. 13 je znázorněn trojrozměrný souřadnicový systém zobrazující součet harmonických signálů. Dvě souřadnicové osy definují čas a amplitudu signálu, jenž byl již zmíněn u předchozího popisu signálu v oblasti času. Třetí souřadnicí je frekvence, která umožňuje analýzu harmonických složek. Pokud se na obrázek podíváme ve směru osy frekvence, obdržíme průběh zobrazený na obrázku 13b), tj. průběh v časové oblasti.

Při pohledu na obrázek 13a) ve směru časové souřadnice obdržíme průběh vyobrazený na obrázku 13c), tj. průběh ve frekvenční oblasti, jenž se nazývá frekvenční spektrum.

Při zobrazení signálů v časové nebo frekvenční oblasti nejsou ztraceny nebo změněny informace o signálech, pouze tyto transformace umožňují náhled na signál z jiné strany [14].

Kmitavý pohyb je možné vyhodnotit pomocí čtyř ukazatelů charakterizujících periodický průběh kmitavého pohybu. Tyto veličiny jsou vyobrazeny na níže uvedeném obr. 14.



Obr. 14 Znázornění měřených veličin kmitání na sinusové křivce

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x^2(t)) dt}, \quad (4.20)$$

$$Average = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt, \quad (4.21)$$

$$CrestFactor = \frac{Peak}{RMS} \quad (4.22)$$

Peak-Peak – maximální rozkmit (špička – špička) nebo také dvojitá amplituda udává největší rozkmit hodnocené vlny. Její použití je vhodné zejména tam, kde je z hlediska maximálně přípustného mechanického namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka chvění.

Peak – vrcholová hodnota (špička) popisuje amplitudu krátkodobých jevů, mechanických rázů apod., indikuje však jen přítomnost špičky a neodráží časový průběh ani kmitočtové složení hodnoceného chvění.

Average – střední hodnota (průměr) naopak odráží časový průběh hodnoceného chvění, avšak nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině.

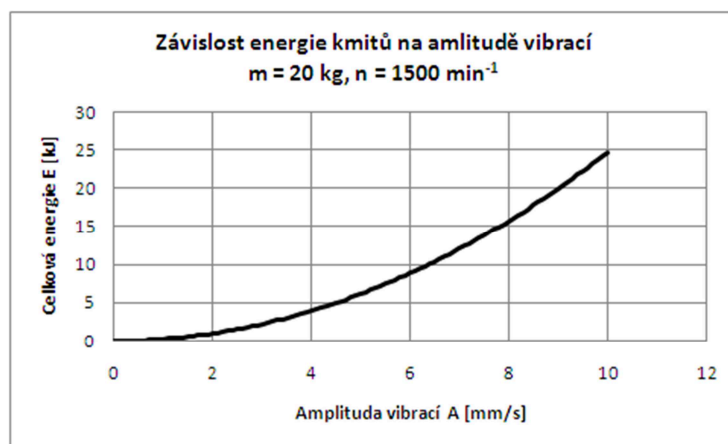
RMS – efektivní hodnota (root mean square) je nejdůležitější hodnota, která odráží časový průběh chvění a současně přímý vztah k jeho energetickému obsahu, je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického chvění[31].

Při kmitavém pohybu vzniká kinetická energie E_K a potenciální energie E_P . Pro harmonický průběh můžeme jejich výslednou složku E vyjádřit ve tvaru:

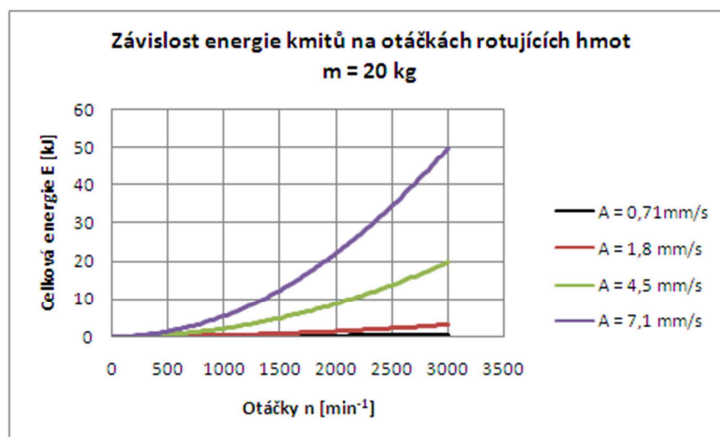
$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad (4.23)$$

kde E_k – kinetická energie
 E_p – potenciální energie
 ω – úhlová frekvence
 A – amplituda kmitavého pohybu
 m – hmotnost

Energie kmitavého pohybu je tedy závislá na hmotnosti kmitající části m , kvadrátu úhlové frekvence ω a kvadrátu amplitudy kmitavého pohybu A .



Obr. 15 Graf závislosti celkové energie kmitání na amplitudě vibrací



Obr. 16 Graf závislosti celkové energie kmitání na otáčkách rotujících hmot pro jednotlivá pásma vibrací A, B, C, D stroje třídy I. dle ČSN ISO 10816-3

Tření v ložiscích rotačních strojů [34]

Tření je jev, který vzniká mezi dvěma pohybujícími se plochami. Vznikají při něm třecí síly působící proti vzájemnému jejich pohybu. Pro překonání těchto sil je nutné vykonat práci, jež se následně mění v teplo. V ložiscích se zpravidla setkáme s klidovým, smykovým a valivým třením (odporem), dále pak s hydrostatickým a hydrodynamickým třením. Smykové třecí síly mezi jednotlivými částmi ložisek jsou dány vlastnostmi jejich třecích ploch (koeficientem smykového tření) a kolmou zatěžující složkou síly podle vztahu:

$$F_T = f \cdot F_L \quad (4.24)$$

Teplo vzniklé smykovým třením je pak určeno prací ložiska potřebného k překonání všech třecích sil:

$$Q = W = W_K + W_T + W_O + W_M \quad (4.25)$$

kde

- W_K – práce potřebná k rozběhu stroje
- W_O – práce spotřebovaná na překonání valivého odporu
- W_M – práce potřebná k překonání odporu maziva (závisí na jeho hustotě, viskozitě, dávkování a čistotě)
- W – výsledná práce

$$W_T = F_T \cdot s \quad (4.26)$$

je práce potřebná k překonání třecích složek v ložisku (prokluzování jednotlivých valivých elementů, tření v ložiskové kleci.

Výsledná práce W pak vyvolá v ložiskovém systému o hmotnosti m a měrné tepelné kapacitě c oteplení ΔT podle vztahu:

$$\Delta T = \frac{W}{m \cdot c_2} \quad (4.27)$$

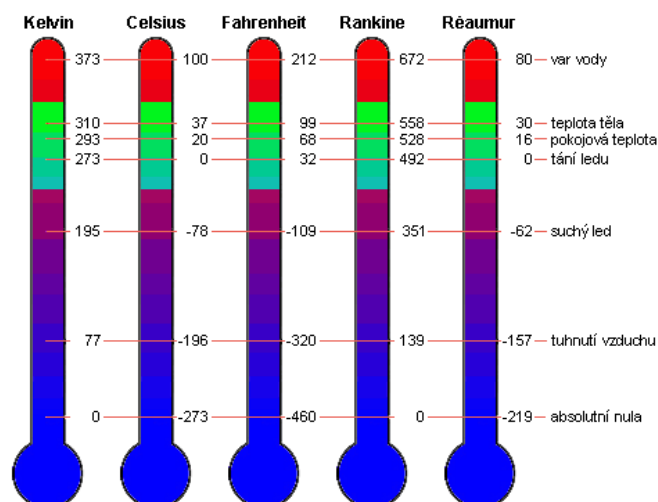
Mazání ložisek

Funkce mazání má v ložiscích několik hlavních úkolů, a to zmenšit tření a opotřebení, odvod tepla případně nečistot a zabránění koroze. Kromě toho je jejich vedlejším účinkem, i když žádoucím, tlumení rázů a vibrací. Je tedy zřejmé, že způsob mazání ložisek má výrazný vliv jak na přenos vibrací z rotujících částí na nerotující, tak i na teplotu naměřenou na jejich povrchu. Toto závisí zejména na druhu mazání a maziva (olejové mazání brodivé rozstřikovací, olejovou mlhou, oběhové mazání, mazání plastickým mazivem apod. Kupříkladu plastická maziva mají větší schopnost utlumit vibrace než maziva olejová, vedle toho oběhové olejové mazání zprostředkovává větší odvod tepla než mazání brodivé. [34]

4.2 Teplota

Teplota je veličina určující stav termodynamické rovnováhy uzavřené soustavy těles. Tento stav je charakterizován termodynamickou teplotou. Teplota jako taková, je fyzikální veličina a není možné ji zaměňovat za teplo. Teplo definujeme jako energii závislou na pohybu částic v uzavřené soustavě těles. Teplota se mění nepřímo přes jiné fyzikální veličiny. [13]

Termodynamická teplotní stupnice obr. 17 je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Základní jednotkou je Kelvin (K), počátek má v absolutní nule. Kelvin byl určen zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody jako referenčního bodu termodynamické stupnice. Hodnota referenčního bodu byla stanovena na $T = 273,15$ K. Teplotu určujeme ještě podle dalších teplotních stupnic, viz tab. 2, jako jsou Celsiova ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheitova ($^{\circ}\text{F}$), Rankinova ($^{\circ}\text{R}$) a Réaumurova ($^{\circ}\text{R}$).



Obr. 17 Teplotní stupnice [22]

Tab. 2 Přehled teplotních stupnic

Teplotní stupnice	Jednotka	Značka	Převod na °C	Převod ze °C
Kelvinova	kelvin	K	$t_C = T - 273,15$	$T = t_C + 273,15$
Celsiova	stupeň Celsia	°C		
Fahrenheitova	stupeň Fahrenheita	°F	$t_C = 5/9 \cdot (t_F - 32)$	$t_F = 9/5 \cdot t_C + 32$
Rankinova	stupeň Rankina	°R	$t_C = 5/9 \cdot (t_R - 273,15)$	$t_R = 9/5 \cdot t_C + 273,15$
Réamurova	stupeň Réamura	°R	$t_C = 5/4 \cdot t_R$	$t_R = 4/5 \cdot t_C$

Znalost teploty je nutná ve všech oblastech lidské činnosti. Jednou z prvních aplikací teploměru byl lékařský teploměr, který byl vynalezen roku 1866.

Základem bezpečnosti a spolehlivosti v energetice, v letecké, železniční a automobilové dopravě, ve veškeré průmyslové produkci elektrospotřebičů, ve výpočetní a telekomunikační technice je technická diagnostika, přičemž měření teploty patří mezi základní diagnostické veličiny.

Každý měřicí přístroj nebo měřicí systém pro měření libovolné fyzikální veličiny, má stanovený rozsah teploty, v němž je zajištěna mezní hodnota nejistoty přístroje nebo nejistoty ovlivňující nejistotu měření jiných veličin.

Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teploty označuje měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem) záření vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm .

Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra od 0,4 μm do 0,78 μm , oblast blízkého infračerveného spektra od 0,78 μm do 1 μm , oblast krátkovlnného spektra od 2 μm do 3 μm , oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 μm a konečně oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5 μm do 25 μm . Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od -40°C do $+10\,000^{\circ}\text{C}$. [13]

Nejistoty u bezdotykového měření teplot

- ◆ nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa,
- ◆ nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem,
- ◆ nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

Rozdíl mezi dotykovým a bezdotykovým měřením teploty je zřejmý. Při dotykovém měření, např. termoelektrickým článkem, dochází k akumulaci dvou nejistot měření. Jednak zářivý tok φ , proudící do vodičů termoelektrického článku způsobí deformaci izoterm v měřeném místě tělesa a jednak vznikne teplotní rozdíl způsobený zářivým tokem φ na stykovém tepelném odporu mezi snímačem teploty a tělesem. Hodnoty těchto nejistot mají stejné znaménko, takže se jejich účinek sčítá.

4.2.1 Měření teplot a teplotních polí pomocí infračervené termografické kamery

Mezi sledované parametry v diagnostice a údržbě se řadí teplota, která je jevem charakterizujícím určitý fyzikální stav měřeného objektu. Díky jejímu sledování lze regulovat výrobní procesy, kontrolovat provozní stavy strojů a zařízení, diagnostikovat přehřívání elektrických spojů, olejových transformátorů, kabelů nebo elektrických či mechanických součástí (např. elektromotory, převodovky) či stavebně tepelné vlastnosti budov.

Termografická měření je bezkontaktní měření teploty. Využívá infračerveného záření pro bezpečné měření povrchových teplot předmětů. Průběh teploty a rozložení se zaznamenává prostřednictvím infračervené termografické kamery. Pomocí infračervené termografické kamery můžeme toto záření zachycovat a uložit ve formě teplotních pixelů, takzvaného termogramu. Je možné měřit i vzdálenější a nepřístupné povrchy a to bez vyřazení diagnostikovaného zařízení z provozu.

Termografická měření se provádí pomocí infračerveného kamerového systému, který měří a zobrazuje infračervené záření vyzařované objektem. Na základě skutečnosti je možné tuto teplotu zobrazit a vyhodnotit.

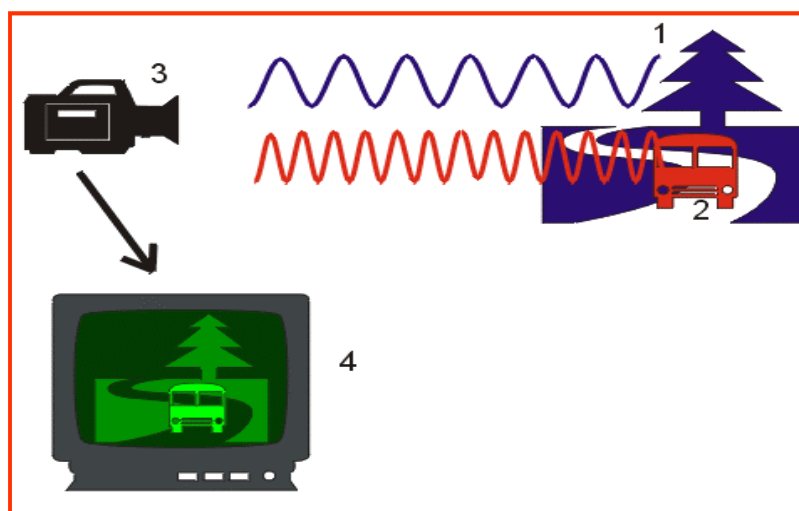
Pro dokumentaci měřeného objektu se obraz – termogram zaznamenává na vyjímatelnou paměťovou kartu. Termogramy jsou vyhodnocovány v PC pomocí softwaru. [13]

Historie Termografie

V roce 1965 představila švédská firma AGA Infrared (později AGEMA Infrared Systems AB) první průmyslově použitelný termografický systém AGA Thermovision® 665. Jednalo se v podstatě o začátek používání termografické techniky (mimo vojenské aplikace) v širokém oboru použití: energetika, různá průmyslová odvětví, petrochemie, stavebnictví, lékařství, výzkum atd. Do ČSSR byl první systém dovezen v roce 1967. [34]

Princip infračervené termografické kamery

Termografie využívá měření částí elektromagnetického spektra, jež je rozděleno na několik vlnových pásem.

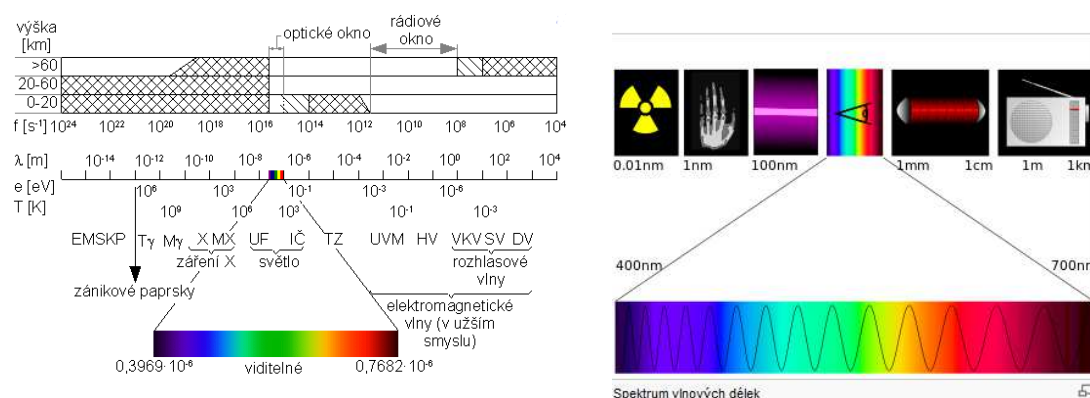


Obr. 18 Princip snímání vlastního tepelného záření těles v IR oblasti [13]

Základní charakteristikou elektromagnetického vlnění je tzv. vlnová délka, označovaná většinou λ (lambda), a měřená ve vhodných délkových jednotkách (v případě viditelného světla nanometry, tj. 10^{-9} m). Vlnová délka nám říká, jak „dlouhá je vzdálenost mezi dvěma hřbety vln“. Analogickou veličinou je frekvence – veličina říkájící nám, kolikrát vlna kmitne za 1 sekundu.

Roztřídíme-li vlnové délky záření vydávaného určitým zdrojem a zjistíme-li intenzity záření na těchto jednotlivých vlnových délkách, dostaneme tzv. spektrum. Na obr. 18 je schematicky naznačena oblast vlnových délek celého elektromagnetického spektra – od nejkratších po ty nejdelší. Úzkou oblast mezi 400 až 700 nm lze vnímat zrakem a definuje se jako světlo.

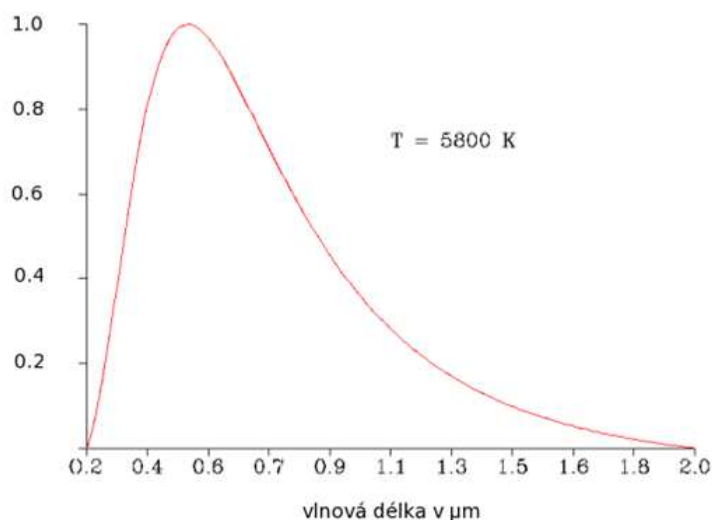
Do elektromagnetického spektra patří radiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelná část spektra, UV záření, rentgenové záření a gama záření. Termografie využívá měření infračervené části (IČ) spektra. IČ spektrum je dále rozděleno na čtyři menší pásma. Jsou to pásma blízké IČ (0.75-3 μm), střední IČ (3-6 μm), vzdálené IČ (6-15 μm) a velmi vzdálené (15-100 μm). Různé měřicí systémy měří v různých spektrech a rozlišují se tak např. dlouhovlnné nebo krátkovlnné systémy apod.[34]



Obr. 19 Elektromagnetické spektrum [23]

Jakmile bylo prokázáno, že elektromagnetické spektrum za hranicemi viditelného světla kontinuálně pokračuje ke kratším i delším vlnovým délkám, došlo k jejich následnému pojmenování. Řešení se nabízelo přímo samo a vznikly tak termíny pro záření ultrafialové („nad fialovou“, zkratka UV z anglického ultraviolet) a infračervené („pod červenou“, zkratka IR z anglického infrared). Nutno připomenout, že UV záření má větší energii než světlo a naopak IR záření menší energii, viz obr. 19.

Uvedené křivky spektrálního vyzařování platí pro černá tělesa. Celková energie vyzářená černým tělesem W_{celk} je pak dána Stefan-Boltzmannovým zákonem. [34]

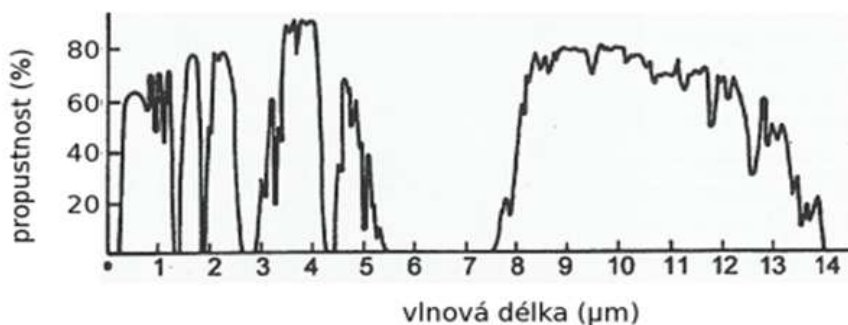


Obr. 20 Vlnová délka

Propustnost atmosféry

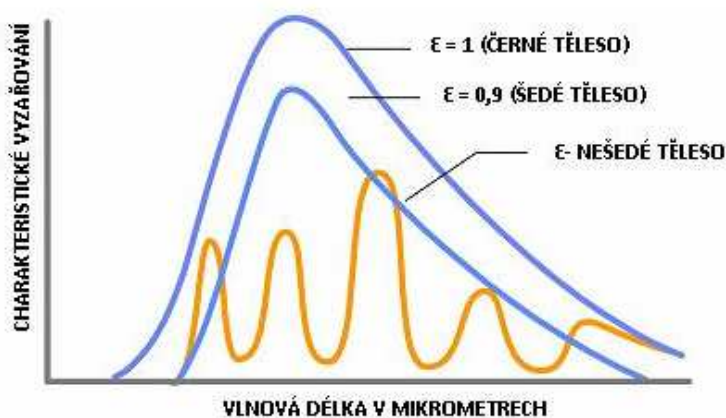
Možnosti využití elektromagnetického záření pro přenos informací volným prostorem jsou omezeny propustností zemské atmosféry. Propustnost atmosféry není stálá a kolísá podle množství vodních par, kondenzace vlhkosti, plyných příměsí, nečistot i směru šíření. Následující graf znázorňuje spektrální propustnost atmosféry v tloušťce 2 km ve vodorovném směru u hladiny moře v pásmu 0.2 až 15 μm .

Z grafu je patrné, že ve sledované oblasti existuje několik pásem, která jsou pro elektromagnetické záření zcela nepropustná. Výrazné je to zejména pro oblast 5.5 až 7.5 μm . V případě kdy záření prochází kolmo k povrchu Země je propustnost ještě výrazněji změněna, zejména v krátkovlnné oblasti, kde se uplatní vliv ozonové vrstvy ve výši 60 km nad mořem, jenž zcela odfiltruje záření Slunce kratší než 0.32 μm . Od 14 μm se atmosféra stává pro elektromagnetické záření znovu nepropustná, a to až do vlnových délek 104 μm . [34]

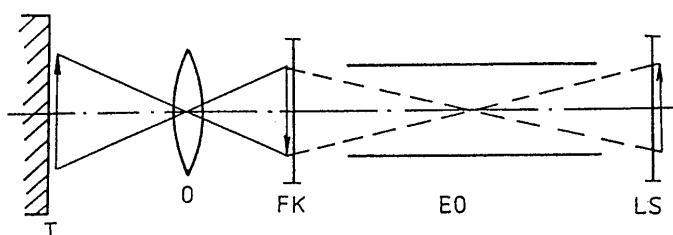


Obr. 21 Vlnová délka

Infračervená termografická kamera neměří přímo povrchovou teplotu, ale povrchová teplota se dopočítává na základě změřeného infračerveného záření a zadaných okrajových podmínek. Mezi nejdůležitější okrajové podmínky patří emisivita povrchu. Emisivita povrchu je bezrozměrné číslo pohybující se v intervalu 0 až 1 a vyjadřuje poměr energie vyzařované objektem při jeho dané teplotě k energii vyzařované absolutně černým tělesem při stejné teplotě. Absolutně černé těleso má emisivitu 1.



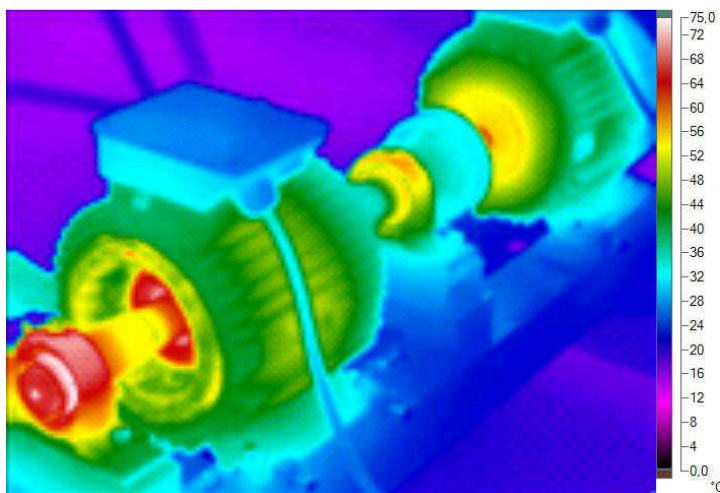
Obr. 22 Emisivita [24]



Obr. 23 Schematické znázornění principu termografických snímků[1]

(T – teplotní pole, O – objektiv, FK – fotokatoda, EO – elektronová optika, LS – luminiscenční stínítko)

Tepelný obraz se vytvoří pomocí objektivu na fotokatodě, která způsobí emisi elektronů, jež jsou dále urychlovány elektronovou optikou a usměrněny na rovinu luminiscenčního stínítka. Tím vzniká termografický obraz.



Obr. 24 Termogram

Termodiagnostika

Diagnostikovaný parametr charakterizující stav diagnostikovaného objektu je teplota. V praxi se jedná o přístroje ke zjišťování hodnot ustálených, nebo proměnných. Podle cílů měření se také volí vhodné typy snímání teploty.

Dotykové měření teploty spočívá v přímém kontaktu čidla s měřeným objektem. Teplota se vyhodnocuje v digitální podobě.

Bezdotykové měření teploty je založené na principu sálání tepla v oblasti infračerveného záření a umožňuje zachycovat teploty od absolutního bodu až do teplot 1800°C.

V diagnostice se využívá pyrometru úhrnného (integrující), jenž vyhodnocuje teplotu přibližně v celém rozsahu spektra vlnových délek Stefan – Boltzmanova zákona. Dále pyrometr pásmový, který je s kvantovým snímačem, vyhodnocující záření v určitém pásmu vlnových délek. Z tohoto důvodu je tento druh pyrometru přesnější. [13]

Indikace teplotních obrazů

Nejvíce rozšířeným systémem je termografické měření, které pracuje s optickomechanickým systémem rozkladu obrazu pomocí otočných hranolů. Snímání jednotlivých bodů objektu se uskutečňuje změnou optické osy. Zobrazení izoterem je možné v celé řadě provedení, nejpoužívanější zobrazení je barevné.

4.3 Vibrodiagnostika

Provoz všech točivých strojů je provázen mechanickým chvěním. Tomuto chvění je nemožné se v provozní praxi vyhnout. Příčinou vzniku chvění jsou dynamické síly doprovázené výrobními nepřesnostmi, třením a odvalováním pohyblivých uzlů, nesouosostí,

nevyvážeností a dalších mechanických případně elektromagnetických a ventilačních závad. Chvění jako takové, může vyvolávat rezonanci i na jiných součástech a konstrukcích, čímž se stane zdrojem dalšího mechanického chvění a hluku. [6]

Mechanické chvění taktéž může plnit i užitečné funkce, a to uměle vybudované mechanické kmity, jež tvoří základ práce vibračních podavačů, beranidel, sbíječek apod. Tato oblast kmitání ovšem není základem technické bezdemontážní diagnostiky.

Technická bezdemontážní diagnostika využívá jako diagnostického parametru chvění, které patří mezi prvotní znaky změn provozního stavu.

Chvění je kmitavý pohyb pevných těles. Jednotlivé složky mechanického chvění mohou být identifikovány pouze ze závislosti jeho amplitud na kmitočtu. Rozklad složeného chvění na kmitočtové složky se provádí pomocí Fourierovy transformace, je zásadní pro provedení frekvenční analýzy vibrací a patří mezi základní metody v oboru měření vibrací. Výstupem Fourierovy transformace jsou frekvenční spektra znázorňující grafickou závislost amplitud vibrací na frekvenci. [1]

Kmitání strojů a zařízení může být vyvoláno celou řadou příčin, jako je nevyváha, vadná spojka, nesouosost, vadná ložiska, závada na převodové skříně apod. Frekvenční analýza umožní přesnou identifikaci jednotlivých příčin kmitání.

4.3.1 Rychlá Fourierova transformace – FFT

Průběh signálu se snímá v čase, resp. v časové oblasti. Pro technické aplikace je vhodnější rozklad na soubor subharmonických funkcí, které se liší amplitudou, frekvencí a svou fází. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova (nekonečná) řada. Pro obecné periodické funkce se používá Fourierova transformace.

Fourier odvodil, že signál je složen z několika harmonických složek s různými kmitočty. Analýzou amplitud, frekvencí a fází těchto frekvenčních složek je možné získat znalosti také na základě průběhu původního spektra a příčiny vzniku vibrací celého systému. [14]

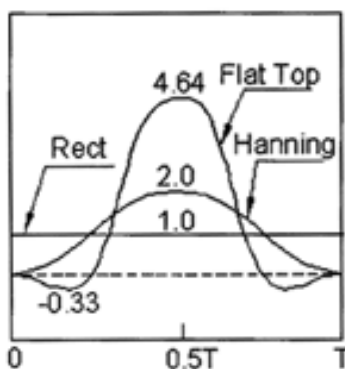
Souřadnicový trojrozměrný systém, jenž je uveden na obr. 13, zobrazuje součet harmonických signálů. Dvě souřadnicové osy zachycují čas a amplitudu signálů známých z předešlého popisu signálu v oblasti času. Třetí znázorňuje frekvenci, která umožňuje analýzu harmonických složek.

Podobně jako v oblasti signálů spojitých je možné i v oblasti signálů diskrétních definovat transformaci, která bude diskrétní obdobou Fourierovy transformace ve spojitě oblasti. Tuto transformaci nazýváme Discrete Fourier Transform – DFT – Diskrétní Fourierova

transformace. Výpočet DFT vyžaduje velký počet násobení (N^2), což je časově náročná operace. Proto byl vyvinut algoritmus umožňující značné urychlení výpočtu. Tento algoritmus se označuje jako Fast Fourier Transform – FFT – Rychlá Fourierova Transformace.

Při měření signálu v našem případě vibrací, je měřicími systémy spojitý průběh veličin nahrazen posloupností hodnot – vzorkovanou funkcí. Se vzorkovaným signálem pak mohou pracovat výpočetní programy. Vzorkovací funkce (x_k) vznikne ze spojitě funkce času ($x(t)$) výběrem jejich hodnot v časových okamžicích. Při záznamu dat pomocí měřicích přístrojů si obsluha nastaví vzorkovací frekvenci (N – vzorků /s), rozsah měřeného signálu a délku záznamu (N – vzorků). Vzorkovací frekvence a citlivost A/D převodníků má vliv na přesnost měření. Délka záznamu signálu a jeho vzorkovací frekvence ovlivňuje také parametry FFT analýzy.

Chyby v odhadu frekvence a amplitudy lze částečně kompenzovat vhodnou volbou časového okna. Pro praktické měření mají význam pouze dvě okna, a to časové okno Hanning a časové okno Flat Top. Při měření není obvykle známá ani amplituda ani frekvence složek signálu, což je důvodem zjišťování těchto parametrů. V tomto případě se používá okno typu Hanning. Pro měření, u nichž je důležité přesně znát amplitudu a nezáleží přitom na počtu čar, se spíše používá okno Flat Top. V případě, kdy je zaručené, že spektrum obsahuje jen harmonické složky, se jako nejvhodnější nabízí využití okna obdélníkového.



Obr. 25 Volba časového okna[13]

Měření veličiny

Chvění je kmitavý pohyb pevných těles kolem určité, zpravidla rovnovážné polohy. Počet plných cyklů kmitavého pohybu za vteřinu se nazývá kmitočet a vyjadřuje se v Hz.

Jednotlivé složky mechanického chvění mohou být zjištěny pouze ze závislosti jeho amplitud na kmitočtu. Rozklad složeného chvění na kmitočtové složky se nazývá frekvenční analýza a patří mezi základní metody v oboru měření chvění a bezdemontážní diagnostiky. Výsledkem frekvenční analýzy jsou frekvenční spektra, grafickou závislost amplitud chvění na kmitočtu znázorňují spektrogramy.

Amplitudy mechanického chvění určující přímo jeho nebezpečnost a škodlivost je možno kvantitativně hodnotit několika způsoby.

Teorie snímačů

Při měření jakékoliv veličiny charakterizující chvění se nejčastěji používají snímače zrychlení, jelikož rychlost a výchylku lze stanovit použitím integrujících členů.

Jako elektromagnetický měnič se používá piezoelektrický snímač zrychlení (akcelerometr).

Charakteristickým prvkem piezoelektrického snímače zrychlení je výřez z piezoelektrického materiálu, zpravidla z uměle polarizované piezoelektrické keramické hmoty vykazující výrazný piezoelektrický jev. Podstatou tohoto jevu je vznik elektrického náboje na čelních stěnách výřezu z piezokeramiky při jeho mechanickém namáhání tahem, tlakem nebo stříhem.

Vznikající elektrický náboj je úměrný působící mechanické síle. Piezoelektrický člen se umísťuje a konstruuje tak, aby při kmitavém pohybu snímače na něj působila síla úměrná zrychlení přídavné hmoty, což odpovídá Newtonovu zákonu.

Všeobecný požadavek, jenž je kladen na snímač je co největší elektrický signál při malých zrychleních, což vyvolá nutnost značně velkého piezoelektrického členu a tím následnou vysokou hmotnost a velkou rozměrnost.

Citlivost u snímače definuje poměr elektrického signálu snímače ke zrychlení, které by signál vyvolalo.

5 Metody a postup řešení disertační práce

Úkolem disertační práce je stanovení interakce mezi teplotou a vibracemi, které byly naměřeny na jednotlivých uzlech experimentálních modelů.

Jednotlivými měřeními na těchto modelech byly změřeny celkové hodnoty rychlostí vibrací společně s frekvenčními spektry a taktéž teplota, k jejímuž zjištění se použil dotykový teploměr a infračervená termografická kamera.

Popsané cíle disertační práce v kapitole 2 budou dosaženy níže uvedeným postupem, který zahrnuje vedle teorie i cíle experimentálního měření a následné vyhodnocení.

Teoretická část je doprovázena těmito body:

- ♦ analýzou současného stavu diagnostiky,
- ♦ analýzou současného stavu provozování ložisek,
- ♦ analýzou diagnostiky pohonu, strojních skupin a ložisek,
- ♦ zásadami pro navržení měřicího systému.

Praktická část disertační práce:

- ♦ sestavení modelů pro experimentální měření,
- ♦ návrh měřicího systému pro měření teplot a vibrací,
- ♦ měření uměle vybuzeých vibračních účinků na experimentálním modelu a následné oteplení.

Řešením této disertační práce je vyjádřit závislost mezi teplotou a vibracemi a částečně tak nahradit složité finančně i časově náročné vibrodiagnostické měření za termografické.

Výsledky se budou moci využít:

- ♦ pro objektivizaci hodnocení provozní diagnostiky strojů,
- ♦ k doplnění návodů k obsluze a údržbě strojů,
- ♦ jako podklady pro tvorbu norem,
- ♦ k analýze poruch a havárií strojů,
- ♦ jako návrhu on-line technické diagnostiky strojů.

5.1 Návrh měřicího řetězce a experimentálního pracoviště

- ◆ Projekt – model experimentálního modelu
 - ◆ požadavky na experimentální model,
 - ◆ návrh zapojení experimentálního modelu.
- ◆ Reálný experimentální model
 - ◆ elektromotor hnaný,
 - ◆ elektromotor hnací,
 - ◆ ložiskové jednotky,
 - ◆ spojka,
 - ◆ rám,
 - ◆ hřídelová tyč.
- ◆ Frekvenční měnič – QUATROFREM 400
- ◆ Měřicí přístroje
 - ◆ teplotní
 - Infračervená termografická kamera Fluke Ti45 IR
 - Dotykový teploměr (vlhkoměr, teploměr okolí, dotykový teploměr) Tecpel 322
 - Infračervený teploměr Fluke 568 IR
 - ◆ analyzátor vibrací Adash VA 4300 VA3,
 - ◆ klešťový ampérmetr,
 - ◆ stopky.

5.2 Výstupy

Na experimentálním modelu bylo měřeno teplotní pole sledovaného soustrojí infračervenou termografickou kamerou, dále na ložiskovém domku L2 byl stacionárně připevněn snímač dotykového teploměru, z kterého se odečítala teplota a vlhkost okolí, a teplota z dotykového snímače. Poté se provedlo měření vibrací společně se zjištěním teploty, a to infračerveným teploměrem, přičemž odečet teploty i vibrací v horizontálním a vertikálním směru byl uskutečněn ve stejný okamžik.

Tento postup měření se opakoval ve dvou sériích, přičemž každá byla uskutečněna ve 3 provozních režimech.

Pro první sérii režimů bylo nastaveno vyosení na 0,2 mm vzduchové mezery. Měření probíhalo s vyoseným rotorem bez zatížení, kde byla nastavena síťová frekvence zátěže 50 Hz. Druhý režim s vyoseným postupně zatěžovaný rotorem, kde se pomocí frekvenčního měniče nastavovala frekvence zátěže z 50 Hz, až na 48,2 vždy po 0,3 Hz a třetí režim z první série měření byl vyosený rotor konstantně zatížený na 48,8 Hz.

Ve druhé sérii a dalších 3 provozních režimech byla nastavena vzduchová mezera 0 mm (souosý model). První měření bylo na souosém rotoru bez zátěže při síťové frekvenci 50 Hz. Druhý režim měření se uskutečnil na souosém rotoru postupně zatěžovaném, a to za pomoci frekvenčního měniče, kde byla postupně nastavovaná zátěž z 50 Hz až na 48,2 po 0,3 Hz a jako poslední režim bylo provedeno měření souosého rotoru zatíženého konstantně na 48,8 Hz.

Časová prodleva mezi každým měřením byla minimálně 24 hodin z důvodů zachování počátečních podmínek, ochlazení a ustálení soustrojí.

Na níže uvedené tabulce je shrnutí dvou sérií ve všech provozních režimech.

Tab. 3 Provozní režimy měření

30. 10. 2012 - VBZ -vyosený bez zátěže
31. 10. 2012 - VPZ - vyosený postupně zatěžovaný
1. 11. 2012 - VZ - vyosený zatížený (konst.)
-
6. 11. 2012 - SBZ - souosý bez zátěže
7. 11. 2012 - SPZ - souosý postupně zatěžovaný
8. 11. 2012 - SZ - souosý zatížený (konst.)

Řešení disertační práce spočívalo v měření teplot a teplotních polí, celkových hodnot vibrací na experimentálním modelu a následné analýze naměřených dat. Veškerá tato měření se uskutečnila na experimentálním modelu, kde byly měřeny teploty a teplotní pole, celkové hodnoty rychlosti vibrací ve dvou rovinách, horizontální a vertikální, a celková vlhkost okolí v určitých provozních režimech.

Zpracování a vyhodnocení naměřených dat spočívalo v porovnávání nárůstu celkových hodnot vibrací a následné oteplování na zkušebním modelu.

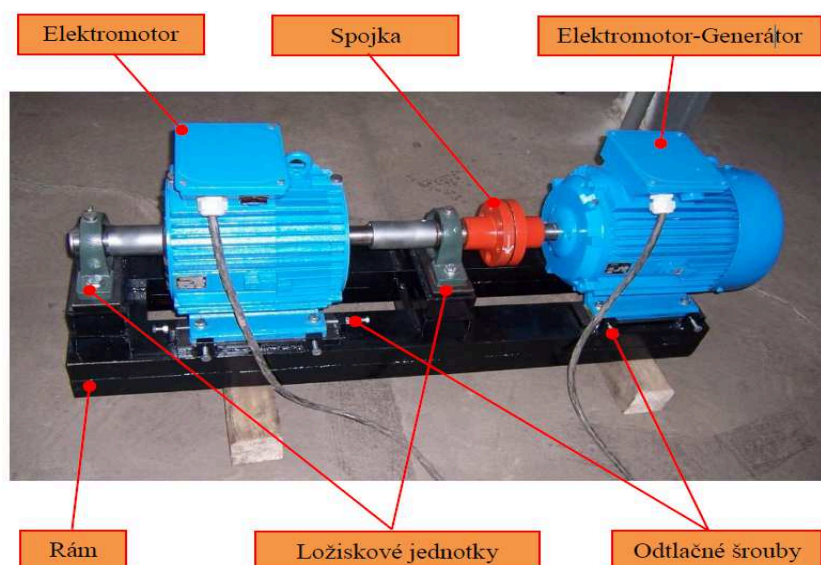
Sledování celkových změn vibrací bylo porovnáváno se změnou teplot a teplotních polí. Důležitým parametrem při vyhodnocování vibrací byla jejich změna při zatěžování elektromotoru v daných krocích a také změna velikosti teplot a vibrací mezi vyoseným a nevyoseným statorem elektromotoru při stejném zatížení.

5.3 Požadavky na experimentální model

Pro experimentální měření musel být model navržen tak, aby bylo umožněno simulovat vibrace a zatížení modelu. Řešení bylo ve vytvoření statického a dostatečně tuhého uložení hřídele rotoru, přičemž excentrického uložení rotoru vůči statoru se docílilo radiálním posunem statoru.



Obr. 26 Experimentální model



Obr. 27 Reálný experimentální model

5.3.1 Navržení experimentálního modelu

Experimentální model byl navržen tak, aby umožňoval nastavení velikosti excentricity rotoru vůči statoru, a tím se docílilo změny velikosti vibrací působící na elektromotor a ložiskové stojany modelu.

Hlavními součástmi modelu pro simulaci a analýzu vibrací a následné oteplování byly dva asynchronní motory. Zatímco první byl použit jako motor pohonu – elektromotor, druhý motor byl upraven, aby simuloval brzdu – generátor. Parametry elektromotoru jsou uvedeny v tabulce 4.

Elektromotor pohonu byl navržen tak, aby bylo možné nastavit posun statoru vůči rotoru, a tím nastavit velikost vzduchové mezery mezi statorovým a rotorovým paketem na velikost 0,2mm.

Elektromotor jako brzda byl tvořen stejným typem elektromotoru o stejných parametrech. Brzdného účinku bylo dosaženo snížením otáček a změnou napájecí frekvence, které jsme docílili za pomoci frekvenčního měniče.

Elektromotory byly spojeny pomocí čepové spojky. Celé soustrojí bylo ustaveno na svařovaném ocelovém rámu. Rám soustrojí se skládal ze dvou U profilů opatřenými stojkami pro usazení ložiskových jednotek. Dosedací desky rámu měly závitové oka pro odtlačné šrouby. Tyto šrouby byly umístěny v radiálním a axiálním směru u obou statorů elektromotorů. Za pomoci těchto odtlačných šroubů na statoru elektromotoru lze posunout stator v horizontálním směru a nastavit tak velikost vzduchové mezery na obou koncích rotorového paketu.

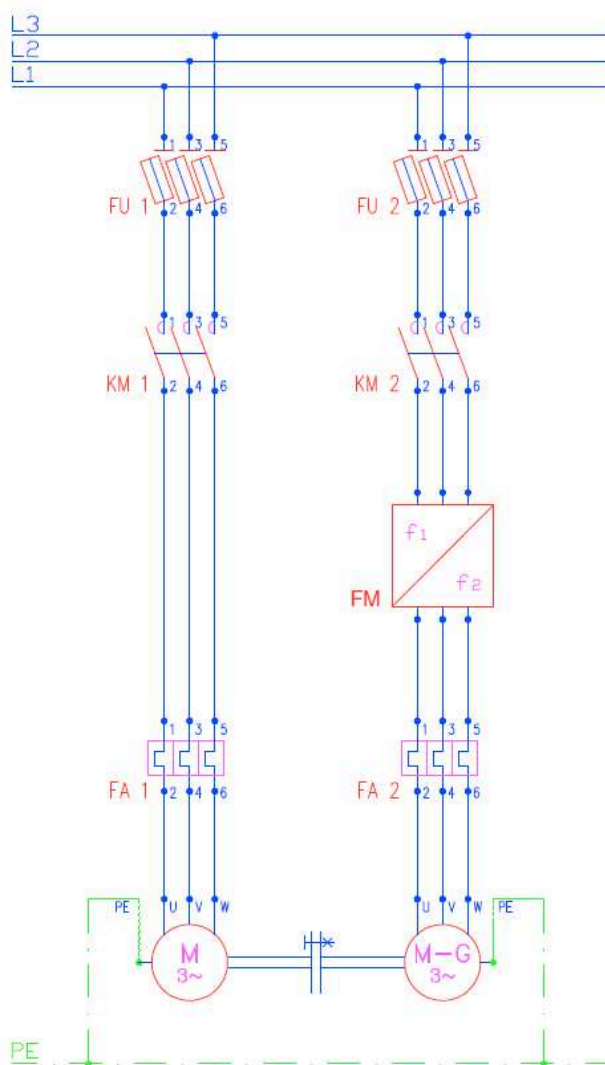
Tab. 4 Štítkové hodnoty elektromotoru

ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE HNACÍHO ELEKTROMOTORU		ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE HNANÉHO ELEKTROMOTORU	
Výrobce	MEZ FRENŠTÁT	Výrobce	MEZ FRENŠTÁT
Elektromotor	Asynchronní elektromotor 3~	Elektromotor	Asynchronní elektromotor 3~
Typ elektromotoru	F160 M07	Typ elektromotoru	F160 M02
Výrobní číslo	6934667	Výrobní číslo	8111860-8
Krytí	IP44	Krytí	IP44
Tvar	M1001	Tvar	M1001
Napájecí frekvence	50 Hz	Napájecí frekvence	50 Hz
Zapojení vinutí	D	Zapojení vinutí	D
Jmenovitý výkon	15 kW	Jmenovitý výkon	15 kW
Jmenovité otáčky	2900 min-1	Jmenovité otáčky	2900 min-1
Jmenovité napětí	380 V	Jmenovité napětí	380 V
Jmenovitý proud	29,5 A	Jmenovitý proud	29,5 A
Třída izolace	F	Třída izolace	F
Typ provozu	S1	Typ provozu	S1
Hmotnost	120 kg	Hmotnost	120 kg
Norma	ČSN 358300	Norma	ČSN 358300

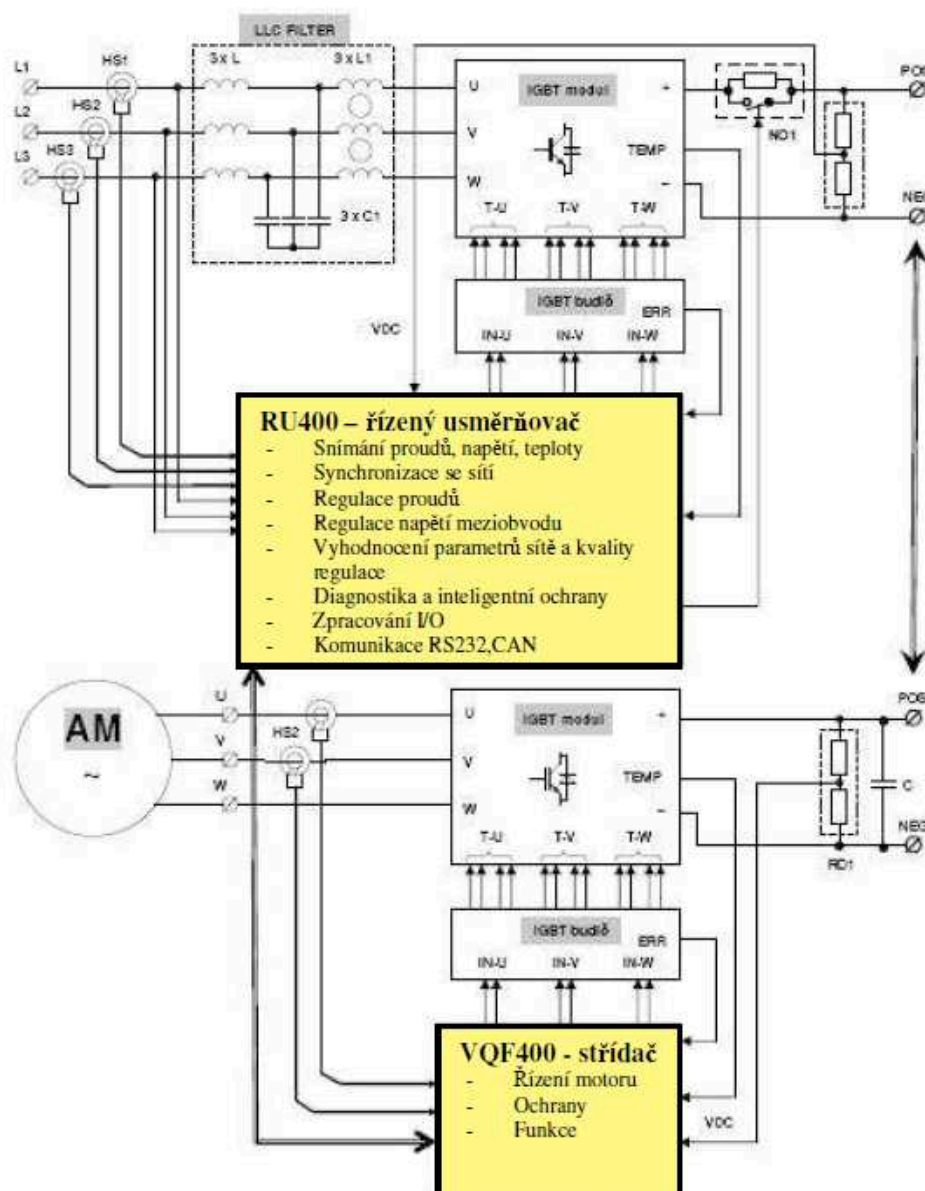
5.4 Zapojení experimentálního modelu a nastavení otáček

Elektromotory u použitého soustrojí v experimentálním měření byly napájeny síťovým napětím 400 V při odebíraném jmenovitém proudu 29,5 A. Hnací elektromotor se zapojil do sítě za pomoci pojistkového odpojovače, stykače a motorové ochrany. V silovém obvodu brzdného elektromotoru byl zařazen čtyřkvadrantový rekuperační frekvenční měnič QUATROFREM 400. Zapojení frekvenčního měniče lze vidět na obr. 28, struktura a uspořádání jednotlivých funkčních bloků měniče je na obr. 29.

Za pomoci uvedeného frekvenčního měniče byl vyvolán brzdný moment na hnacím elektromotoru, a to snížením frekvence napájecí sítě brzdného elektromotoru. Fotografie použitého frekvenčního měniče lze vidět na obr. 30.



Obr. 28 Silové schéma zapojení modelu [11]



Obr. 29 Struktura a uspořádání jednotlivých funkčních bloků měniče QUATROFREM 400



Obr. 30 Použitý frekvenční měnič

6 Návrh měřicího řetězce a metodiky měření

Na experimentálním modelu pro zjišťování závislosti teploty na vibracích pohonných jednotek byly sledovány tyto parametry:

- ◆ vibrace v horizontální a vertikální rovině na ložiskových štítech hnacího elektromotoru,
- ◆ vibrace v horizontální a vertikální rovině na ložiskových domcích experimentálního modelu,
- ◆ vibrace v horizontální a vertikální rovině na statoru elektromotoru,
- ◆ teploty a teplotní pole na ložiskových stojanech elektromotoru,
- ◆ teploty a teplotní pole na statoru elektromotoru,
- ◆ vlhkost a celkové ochlazování na ložiskové jednotce experimentálního modelu,
- ◆ fázové hodnoty napájecích napětí a proudů hnacího elektromotoru,
- ◆ poloha statoru vůči rotoru upraveného elektromotoru.

6.1 Poloha statoru vůči rotoru elektromotoru

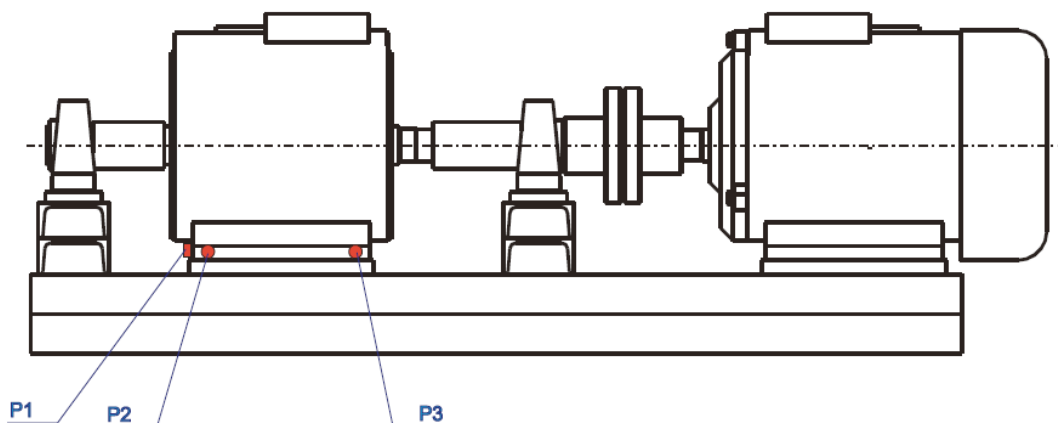
Pro experimentální měření musel být model konstruován tak, aby byla možná simulace vibrací, kterých se docílilo nastavením velikosti vzduchové mezery mezi rotorovým a statorovým paketem. Nastavení přesné polohy zajišťovaly odtlačné šrouby, které byly umístěny po obou stranách patek elektromotoru v radiálním a axiálním směru, jak můžeme vidět na obrázku 32.

Polohu statoru v axiálním směru vůči rotoru jsme nastavili pomocí montážního přípravku umístěného na čelech statoru. Nastavení polohy radiální se provedlo za pomoci listových měrek přímo ve vzduchové mezeře mezi rotorovým a statorovým paketem při zajištěném pohonu.

6.2 Měření a provozní režimy na modelu zřízeného experimentálního pracoviště

První série měření probíhala tak, že stator i rotor byly v souosé poloze, tzn., že osa statoru i rotoru byla totožná, a excentricita vzduchové mezery byla 0 mm. Přičemž měření probíhalo ve třech režimech, bez zatížení (naprázdno), s konstantní zátěží a postupným zatěžováním (brzděním).

Druhá série měření spočívala v tom, že osy statoru a rotoru nebyly souosé, tzn., že osa statoru byla vůči rotoru posunuta o konstantní excentricitu 0,2 mm. Měření probíhalo opět ve třech režimech, a to bez zatížení (naprázdno), s konstantní zátěží a postupným zatěžováním (brzděním).



Obr. 31. Vyznačená místa pro nastavení polohy statoru [11]

6.3 Měření vibrací na zřízeném experimentálním modelu

Měření vibrací bylo provedeno na celém experimentálním modelu v horizontálním i vertikálním směru dle uvedeného schématu na obr. 32.

Na měřicí místa se před samotným měřením vibrací nalepily podložky z magnetické oceli. Jak už bylo zmíněno, měření vibrací se uskutečnilo v šesti režimech. Stator i rotor se nacházely v souosé poloze, tzn., že osa statoru i rotoru byla totožná, a excentricita vzduchové mezery byla 0,0 mm. Jednalo se o tyto režimy:

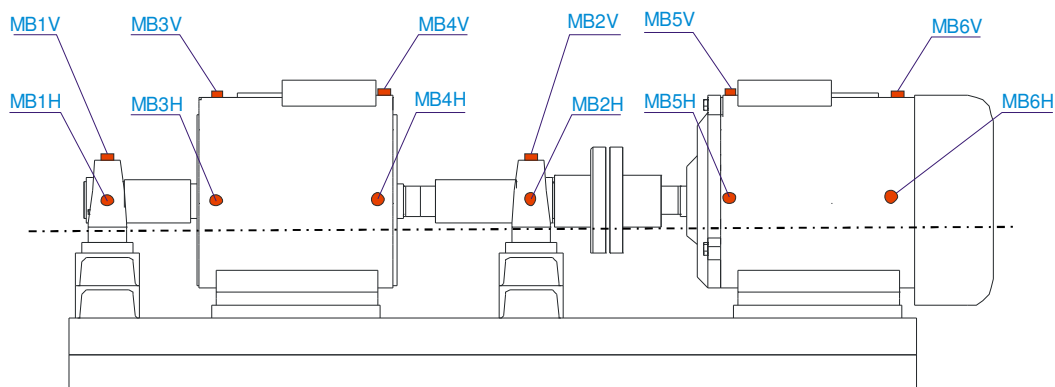
- ◆ bez zatížení (naprázdno),
- ◆ s konstantní zátěží,
- ◆ postupným zatěžováním (brzděním).

Stator i rotor byly v nesouosé poloze, osy se nacházely různoběžně v horizontální rovině, tzn., že osa statoru byla vůči rotoru pootočená o úhel, který odpovídal konstantní excentricitě 0,2 mm na krajních polohách magnetického obvodu. Jednalo se o tyto režimy:

- ◆ bez zatížení (naprázdno),
- ◆ s konstantní zátěží,
- ◆ postupným zatěžováním (brzděním).

Na měření vibrací byl použit analyzátor vibrací Adash A 4300 VA3 se snímačem zrychlení Adash. Měření je zachyceno na obr. 33.

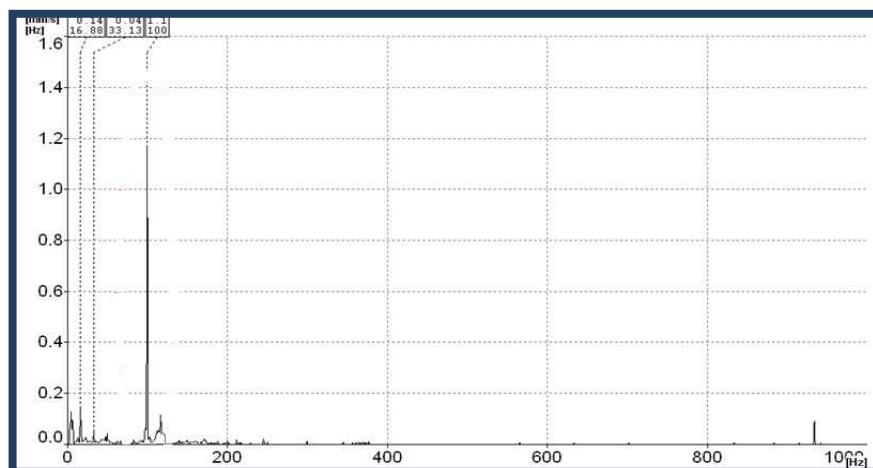
Na zřízeném experimentálním modelu se snímaly celkové hodnoty a frekvenční spektra rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10 až 1000 Hz.



Obr. 32 Vyznačené měřicí body pro snímač



Obr. 33 Analyzátor vibrací Adash A 4300 VA3



Obr. 34 Frekvenční spektrum

Na uvedeném frekvenčním spektru vidíme frekvenční složky první a druhé otáčkové frekvence a druhou harmonickou frekvenci sítě, což ukazuje na nesymetrii elektromagnetického pole elektromotoru.



Obr. 35 Analyzátor vibrací Adash A 4300 VA3

6.3.1 Měření vibrací - přístroj ADASH A 4300 – VA 3

S pomocí analyzátoru a datakolektoru vibrací Adash 4300 – VA3, jenž vidíme na výše uvedeném obr. 35, je možné ihned na místě provádět sběr dat. Na displeji analyzátoru lze vidět aktuálně naměřená data. Za předpokladu potřeby přesnější a podrobnější analýzy se využije počítače.

Analyzátor umožňuje zaznamenávat statická data (celkové hodnoty vibrací v rozsahu efektivní hodnota, špičková hodnota, rozkmit), dále pak dynamická data v podobě časového záznamu, spekter vibrací a přechodové jevy.

Naměřená data zaznamenává v jednotkách rychlosti (mm.s^{-1}), zrychlení ($\text{m.s}^{-2}, \text{g}$), popř. posunutí (μm).

Uvedený přístroj má následující parametry a funkce:

- ◆ grafický podsvícený displej 320 x 240 bodů,
- ◆ možnost připojení snímače zrychlení, rychlosti a posunutí, optickou sondu, DC/AC vstup, klešťový měřicí transformátor proudu,
- ◆ provedení analýzy stavu ložisek - Bearing, L-Bearing,
- ◆ provedení analýzy stavu pomaloběžných ložisek - Peak Watch,
- ◆ FFT analýza, řadová analýza,
- ◆ průměrování signálu,
- ◆ provedení analýzy časového signálu,
- ◆ frekvenční rozsah AC/ICP 0,8-20 000 Hz,
- ◆ detekce RMS, 0-Peak, Peak-Peak,
- ◆ Crest a Kurtosis faktor,

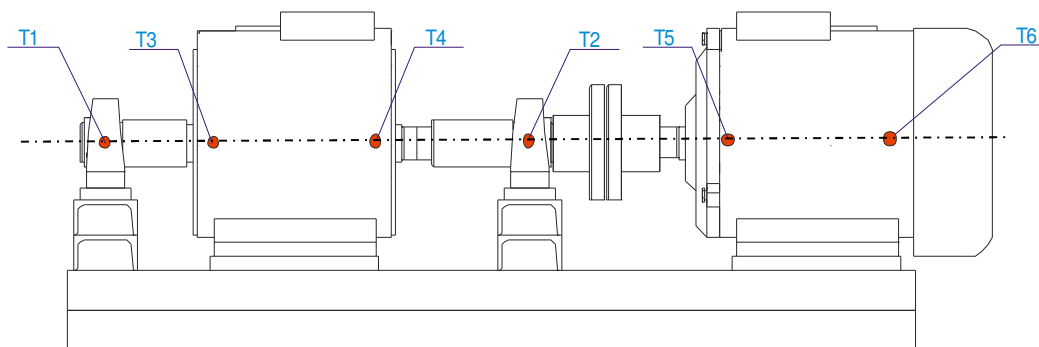
6.3.2 Měření teplot a teplotních polí

Na zřízeném experimentálním pracovišti a experimentálním modelu byly mimo jiné sledovány teploty za těchto podmínek:

- ◆ časových interval 15 min.,
- ◆ teplotní pole celého modelu,
- ◆ jednotlivé části modelu.

Měření teplot probíhalo ve všech režimech a časových intervalech stejně, přičemž se také současně snímaly i vibrace.

Schéma pro měřicí místo teplot je uvedeno na obr. 36. Měření teplot a teplotních polí bylo měřeno za pomoci infračervení termografické kamery Fluke TI 45 IR, kterou vidíme na obr. 38, infračerveného teploměru Fluke 568 IR (viz obr. 37) a dotykového teploměru Tecpel 322 (obr. 41). Jednotlivé parametry měřících přístrojů jsou uvedeny pod schématem míst pro snímání teploty (na obr. 40)



Obr. 36 Schéma měřicích bodů pro snímání teplot



Obr. 37 Infračervený teploměr Fluke

Parametry infračerveného teploměru 568 IR jsou následující:

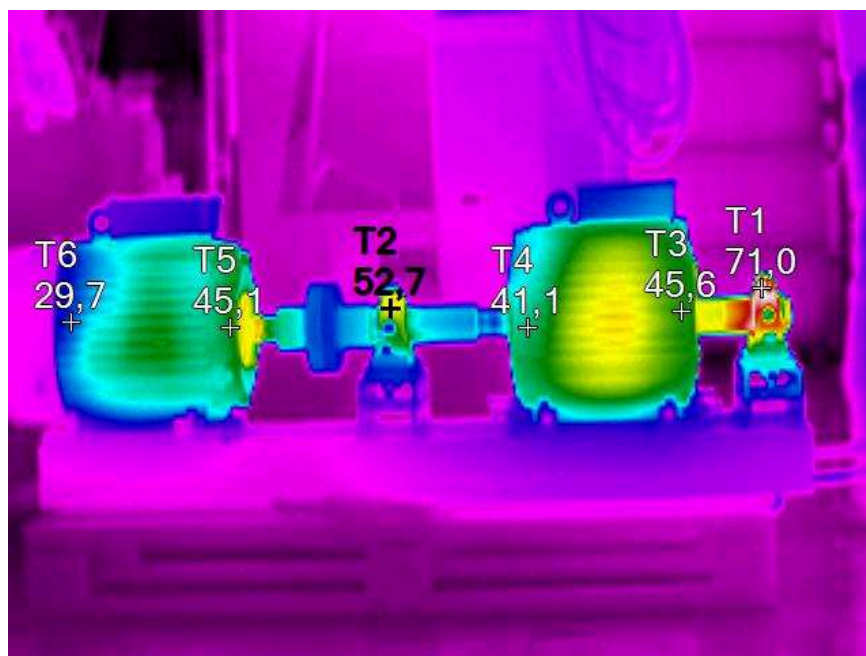
- ◆ rozměry (D x Š x V) 191 x 69 x 254 mm,
- ◆ kalibrace (dle normy) ISO/DKD,
- ◆ doba odezvy < 500 ms,
- ◆ stupeň emisivity 0,10 - 1,0,
- ◆ přesnost $\pm 1\%$ nebo 1°C ,
- ◆ rozsah měření teploty IČ: $-40 - +650^\circ \text{C}$ /typ K: $-40 - +1372^\circ \text{C}$,
- ◆ optika 50/1,
- ◆ napájení 2 x AA,
- ◆ rozlišení teploty $0,1^\circ \text{C}$,
- ◆ hmotnost 1,026 kg.



Obr. 38 Infračervená termografická kamera Fluke

Bližší charakteristika infračervené termografické kamery Fluke TI 45 IR je tato:

- ♦ přesnost: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ z měřené hodnoty,
- ♦ teplotní citlivost do $0,08^{\circ}\text{C}$,
- ♦ měřicí módy: pohyblivý bod, centrální bod, centrální box, oblast min/max, izotermie, automatická detekce teplého a studeného bodu, barevný alarm,
- ♦ korekce emisivity: závisí na zadání uživatelem v oblasti $0,01 - 1,0$,
- ♦ možnost sekvenčního snímání – počet snímků / interval,
- ♦ teplotní rozsah: $-20^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$, $-20^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$, $250^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$.



Obr. 39 Termogram

Na výše uvedeném termogramu vidíme teplotní pole experimentálního modelu. Na tomto modelu se provedlo nastavení s vyoseným rotorem. Při pohledu na model je vidět výraznější oteplení ložiskových domků v důsledku značných sil působících na ložiska.

Ložiska na elektromotorech jsou na povrchu zpravidla o 20° C chladnější než je teplota pod žebrovitým krytím.

6.3.3 Měření teploty okolí a vlhkosti na experimentálním pracovišti

Měření bylo provedeno pomocí přístroje Tecpel 322 na obr. 41. Naměřená data jsou zpracována do grafů uvedených v přílohách.

6.3.4 Teplota okolí

Teplota okolí je parametr, který se využívá ke kompenzaci tepelné cirkulace odražené od objektu a vyzařování tepla mezi infračervenou termografickou kamerou a měřeným objektem.

Za předpokladu nízké emisivity, velké vzdálenosti ke snímanému objektu a při teplotě měřeného objektu relativně blízké teplotě okolí, je velmi důležitá hodnota okolní teploty pro kompenzaci jejího vlivu.

6.3.5 Vzdálenost

Vzdálenost je délka mezi měřeným objektem a objektivem infračervené termografické kamery. Tento parametr se používá pro korekci vlivu způsobeného skutečností, kdy radiace objektu nacházející se mezi objektivem a kamerou je částečně pohlcována v atmosféře, přičemž její přenos v atmosféře klesá se vzdáleností.[15]

6.3.6 Relativní vlhkost

Přesnost měření infračervenou termografickou kamerou může být ovlivněna relativní vlhkostí v atmosféře. Při korekci tohoto vlivu je nutné měřit parametr relativní vlhkosti a zadat jej do vyhodnocovacího softwaru.[15]

6.4 Podmínky pro termografické měření

Vzhledem k tomu, že termografické měření povrchových teplot – teplotních polí – experimentálního modelu probíhalo v připravené experimentální laboratoři v sídle firmy

Hudeczek Service, byly zachovány počáteční podmínky pro měření. Jediné, na co bylo potřeba si dát pozor pro zachování počátečních podmínek, byla doba chladnutí soustrojí, což bylo minimálně 24 hodin mezi každým režimem měření. V experimentální laboratoři byly splněny následující podmínky:

- ◆ při měření nebyl model vystaven slunečnímu záření, které by výrazně ovlivnilo měření,
- ◆ během termografického měření nebyl model vystaven žádným povětrnostním podmínkám,
- ◆ po dobu jednoho režimu měření (jednoho dne) se neměnila okolní teplota z jiného důvodu, než sáláním tepla ze soustrojí v důsledku oteplování soustrojí,
- ◆ v experimentální laboratoři nebyla žádná překážka mezi termografickou kamerou a snímaným objektem.

6.5 Vlastní měření

Ke zjištění základních nutností pro snímání teplotních polí bylo nutné zajistit informace o potřebných veličinách, jež mohou přímo i nepřímo ovlivňovat samotný experiment.

6.6 Nejistoty měření

Cílem každého měření bylo nalézt objektivní výsledek, jenž by se přiblížil reálné hodnotě. Každé měření se však nemohlo vyvarovat některých chybových zjištění, a to systematických nebo náhodných. Systematické chyby lze odstranit při zjištění korekcemi, ovšem náhodné chyby jsou zdrojem nejistot při měření.



Obr. 40 Tecpel 322

Na obr. 41 lze vidět experimentální model a měření vibrací pomocí analyzátoru vibrací Adash (zde zachycen pouze snímač umístěný pomocí magnetu na měřicí místo) u elektromotoru za současného snímání teplota vlhkosti přístrojem Tecpel 322.



Obr. 41 Měření vibrací, snímání teploty a vlhkosti

Na obr. 41 vidíme měření na experimentálním modelu vibrací u elektromotoru ve vertikální rovině při současném snímání teploty okolí, teploty ložiskového domku L2, teplotního pole a vlhkosti.

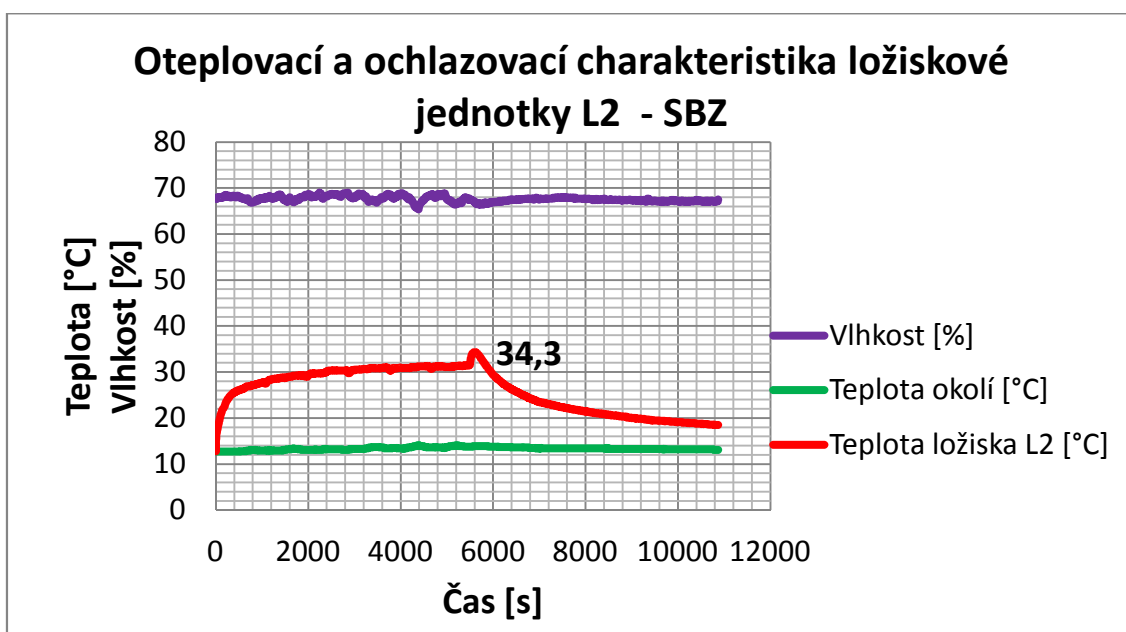
Parametry teploměru Tecpel 322

- ◆ číslcový displej: 4místný LCD displej,
- ◆ rozsah měření: Vlhkost: 0 % - 100 % relativní vlhkosti,
- ◆ T1: -20 °C - +60 °C (-4 °F - +140 °F),
- ◆ T2: -200 °C - +1 370 °C (-328 °F - +2 498 °F),
- ◆ rozlišení: Vlhkost: 0,1 % relativní vlhkosti (RH),
- ◆ T1: 0,1 °C; 0,1 °F,
- ◆ T2: -200 °C - +200 °C 0,1 °C; +200 °C - +1 370 °C 1 °C,
- ◆ -200 °F - +200 °F 0,1 °F; jinak 1 °F,

- ♦ přesnost: Vlhkost: $\pm 2,5 \%$ RH při $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ♦ Teplota: T1: $\pm 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\pm 1,4 \text{ }^{\circ}\text{F}$,
- ♦ T2: podle následující tabulky.

Vlhkoměr vzduchu a teploměr

- ♦ při $(23 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ♦ pro okolní teploty od $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a od $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ přidejte pro každý $^{\circ}\text{C}$ pod $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo nad $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do specifikace přesnosti následující toleranci: $0,01 \%$ z hodnoty + $0,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ♦ $0,01 \%$ z hodnoty + $0,06 \text{ }^{\circ}\text{F}$,
- ♦ $-200 \text{ }^{\circ}\text{C} - +200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm (0,3 \%$ z hodnoty + $1 \text{ }^{\circ}\text{C})$,
- ♦ $+200 \text{ }^{\circ}\text{C} - +400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm (0,5 \%$ z hodnoty + $1 \text{ }^{\circ}\text{C})$,
- ♦ $+400 \text{ }^{\circ}\text{C} - +1\,370 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm (0,3 \%$ z hodnoty + $1 \text{ }^{\circ}\text{C})$,
- ♦ $-328 \text{ }^{\circ}\text{F} - +200 \text{ }^{\circ}\text{F} \pm (0,5 \%$ z hodnoty + $2 \text{ }^{\circ}\text{F})$,
- ♦ $+200 \text{ }^{\circ}\text{F} - +2\,498 \text{ }^{\circ}\text{F} \pm (0,3 \%$ z hodnoty + $2 \text{ }^{\circ}\text{F})$.



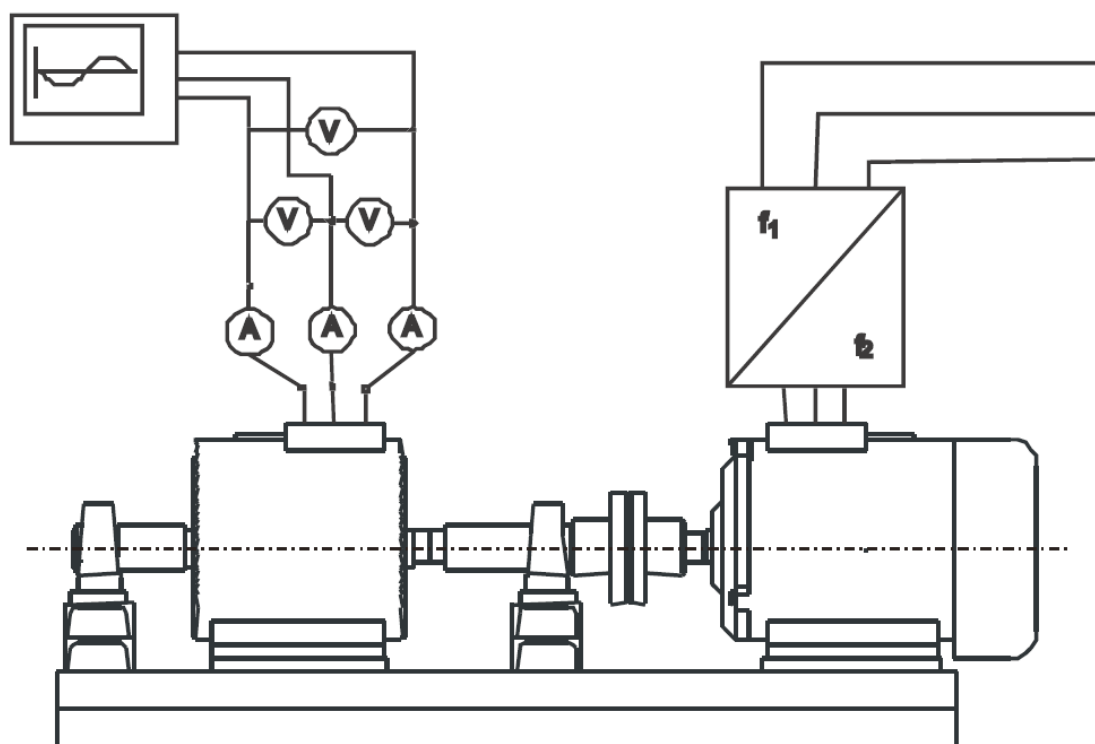
Obr. 42 Graf hodnot z teploměru Tepcel 322

Na obr. 42 jsou graficky znázorněny zjištěné hodnoty vlhkosti při celém režimu měření a následným chladnutím (fialová barva). Hodnoty vlhkosti se ve sledovaném čase pohybovaly v rozsahu 68% – 74%. Červená křivka charakterizující teplotu na ložiskovém domku L2 po dobu chodu soustrojí vykazuje nejprve její nárůst od počáteční teploty 10°C při vypnutí

soustrojí až po nejvyšší naměřenou teplotu $34,3^{\circ}\text{C}$ v důsledku jeho prohřívání. Následný pokles byl zapříčiněn snížením teploty, tzn. chladnutím. Zelená křivka popisuje teplotu okolí, která byla v průběhu měření téměř konstantní.

6.7 Měření elektrických veličin na experimentálním modelu

V rámci měření a dodržení zadaných podmínek k vypracování disertační práce musely být na experimentu také zpracovány a zaznamenány hodnoty napájecího napětí a proudy u hnacího a hnaného elektromotoru. Průběhy napětí a proudů byly měřeny klešťovým ampérmetrem. Současně s měřením elektrických veličin se rovněž zaznamenávaly teploty, vlhkost a vibrace, které se opakovaly v předem stanovených časových intervalech. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 5 až 10. Schéma zapojení modelu je zobrazené na obr. 43.



Obr. 43 Schematické zapojení [11]

7 Výsledky a vyhodnocení naměřených dat u ložiska L2

Veškeré výsledky z jednotlivých režimů měření jsou uvedeny v tab. 5 až 10. Během celého experimentu byla měřena frekvence, proudy, teploty a vibrace v čase.

V disertační práci jsou zpracovány grafy a výsledky pro ložisko L2. Ostatní měřené body a jejich grafy jsou uvedeny v přílohách.

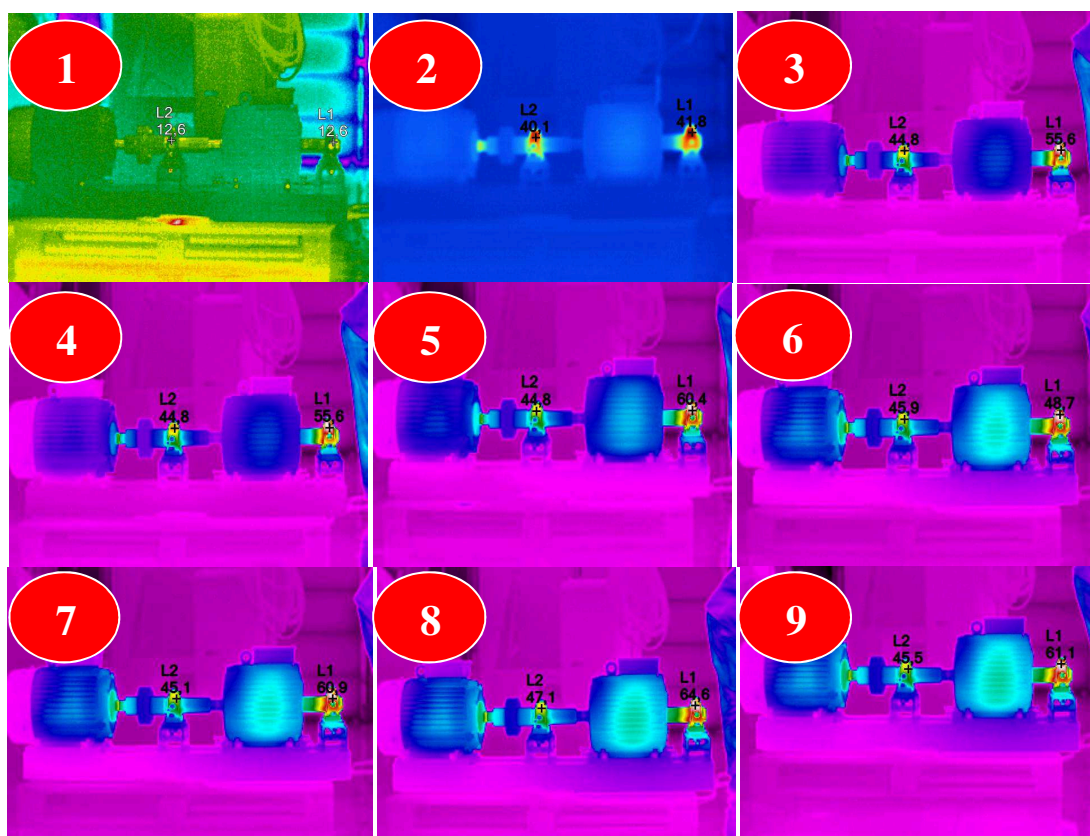
7.1 Měření ze dne 30. 10. 2012 – Vyosený bez zátěže

V tab. 5 jsou uvedena data z měření, jež proběhlo 30. 10. 2012 v režimu vyosený bez zátěže. Pro měření byla nastavena vzduchová mezera 0,2 mm, chod bez zatížení, tzn., nebyl připojen frekvenční měnič.

Po dobu měření byla síťová frekvence 50 Hz a proud 9,9 A. V tabulce jsou zaznamenány časy měření, jež bylo uskutečněno v intervalech po 15 minutách. Schematicky znázorněné měřicí body popisují sledovanou teplotu. Dále jsou uvedeny celkové hodnoty rychlosti vibrací v měřicích bodech, které jsou taktéž schematicky zaznačeny v obr. 33.

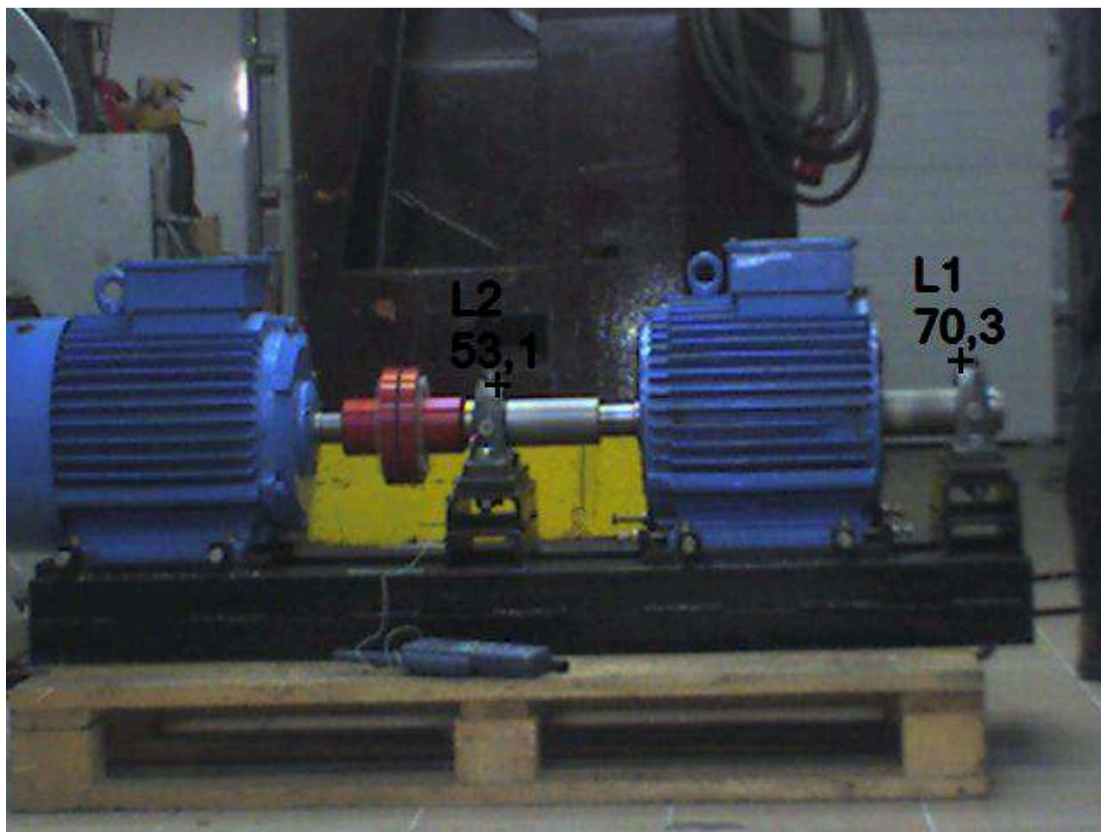
Tab. 5 30.10.2012 - VBZ -Vyosený bez zátěže

Frekvence [Hz]	Proudy [A]	Čas	Teploty								
			T1	T2	T3	T4	T5	T6			
50,0	9,9	10:22	10,5	10,5	10,1	10	10,3	10,3			
50,0	9,9	10:26	42,6	38,6	14,3	13,5	16,6	13,1			
50,0	9,9	10:42	51	42,4	18,4	17	23,2	14,8			
50,0	9,9	10:56	59	43,3	22,2	18,9	28	17,3			
50,0	9,9	11:11	60,5	42	24,8	21,1	31	18,4			
50,0	9,9	11:26	62,2	45,6	26,7	22,2	33,6	18,4			
50,0	9,9	11:41	62,5	45,6	27	22,8	33	19,1			
Celkové efektivní hodnoty rychlostí vibrací [mm.s ⁻¹]											
MB1H	MB1V	MB2H	MB2V	MB3H	MB3V	MB4H	MB4V	MB5H	MB5V	MB6H	MB6V
3,67	3,55	4,23	3,4	3,21	5,65	2,73	4,95	14,03	2,62	1,94	3,46
3,53	3,95	4,15	2,41	9,05	5,33	2,56	3	2,02	2,71	1,81	2,5
3,29	4,85	4,72	2,85	3,16	5,79	3,33	4,01	1,91	5,07	1,71	5,83
3,62	7,28	6,68	4,99	2,84	6,97	2,84	7,13	2,07	7	1,76	6,23
3,95	7,58	4,79	5,56	3,26	7,54	3,63	6,89	2,11	6,49	1,91	5,94
21,6	7,03	5,18	5,04	2,92	7,14	2,63	6,25	2,05	5,04	2,36	5,74



Obr. 44 Termogramy postupného oteplování 30. 10. 2012 – VBZ

Na termogramech obr. 44 je vidět celkové prohřátí soustrojí v prvním režimu (vyosený bez zatížení) od vypnutého soustrojí až po celkové prohřátí a ustálení teplot na experimentálním modelu.

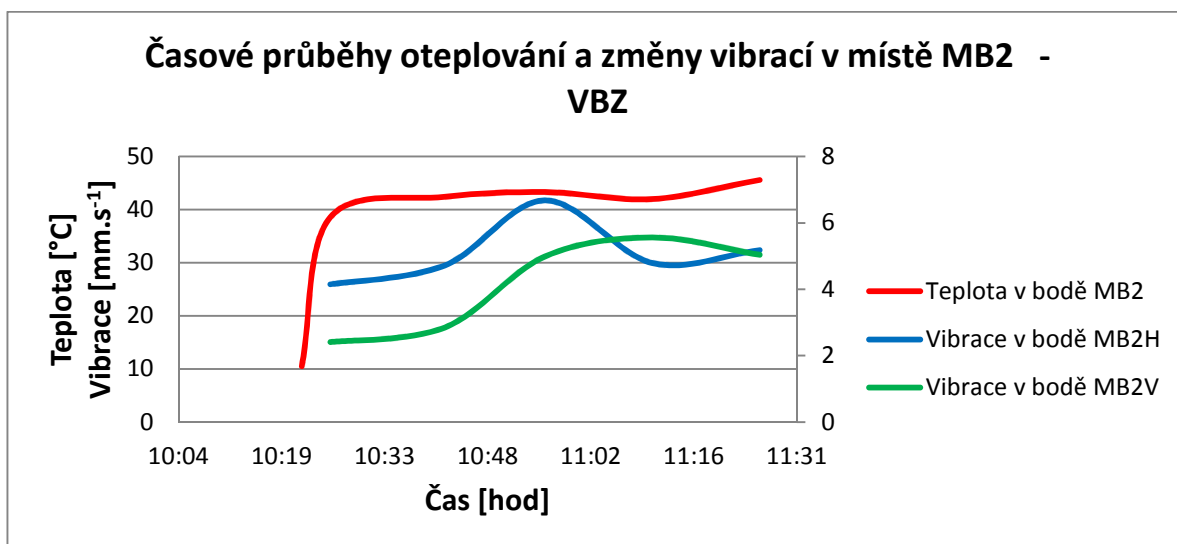


Obr. 45 Znázornění teplot na ložiskových domcích

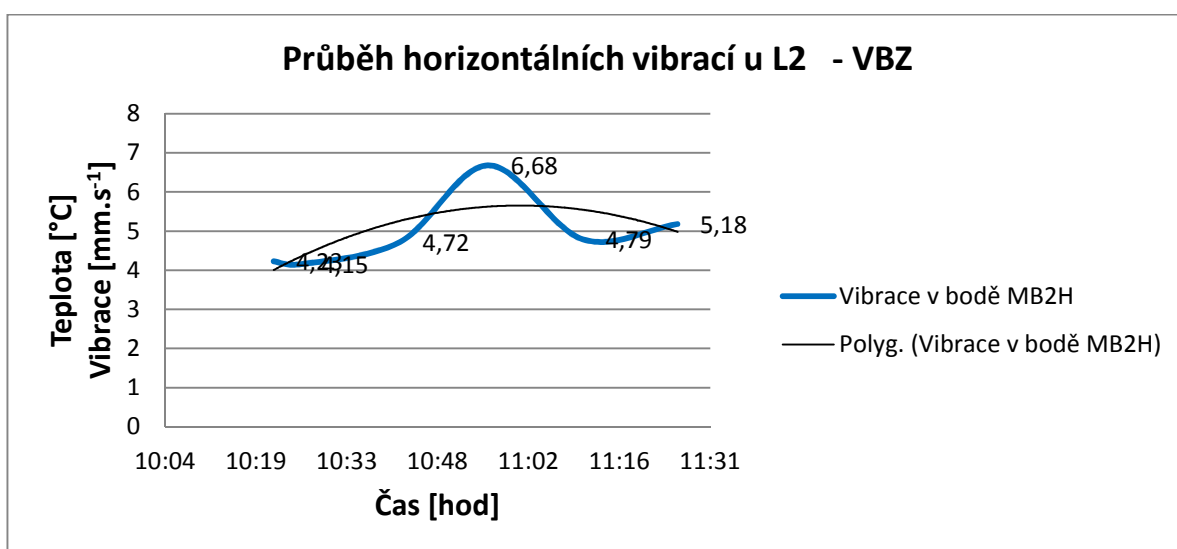
Obr. 45 ukazuje pohled z fotoobjektivu infračervené termografické kamery včetně zaznamenaných teplot na ložiskových jednotkách L1 a L2, které činí u ložiskové jednotky L1 - 70,3°C a u ložiskové jednotky L2 - 53,1°C.

Níže uvedený obr. 46 graficky znázorňuje tři křivky, přičemž červená zobrazuje nárůst teploty v čase, modrá znázorňuje vibrace v horizontálním směru v čase a zelená popisuje průběh vibrací ve vertikálním směru v čase. Všechny tyto křivky zachycují skutečnost od počátku měření až po ustálený stav

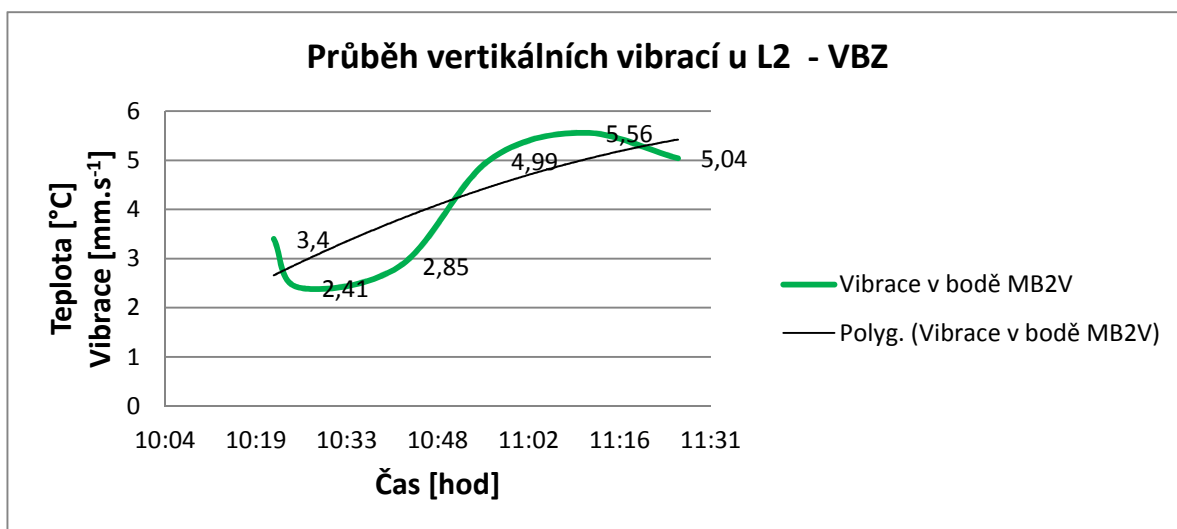
Graf uvedený na obr. 47 vyobrazuje průběh vibrací v režimu vyosený bez zatížení v horizontálním směru v čase. Graf znázorněný na obr. 48 popisuje průběh vibrací v režimu vyosený bez zatížení ve vertikálním směru v čase.



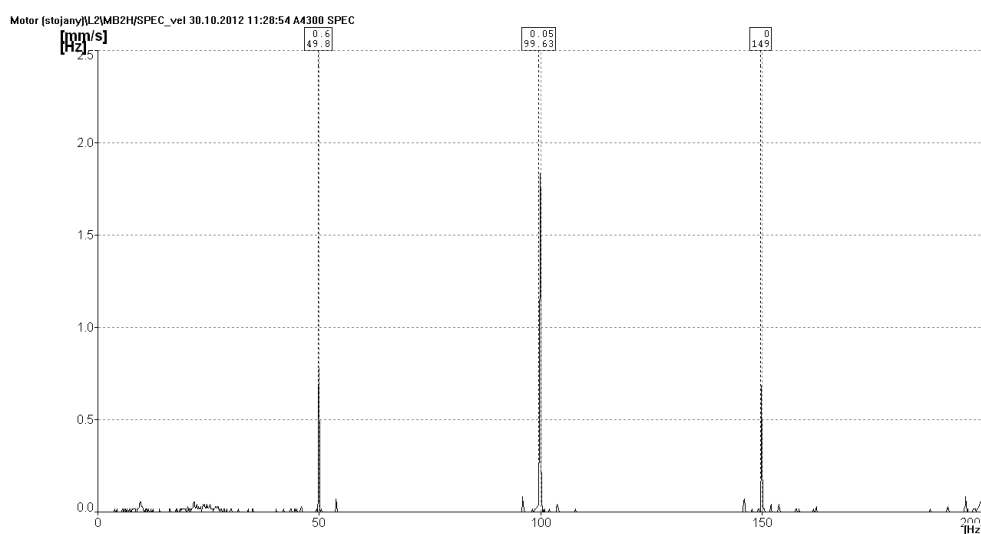
Obr. 46 Graf průběhu oteplování L2 – vyosený bez zatížení



Obr. 47 Graf horizontálních vibrací na L2 - vyosený bez zatížení

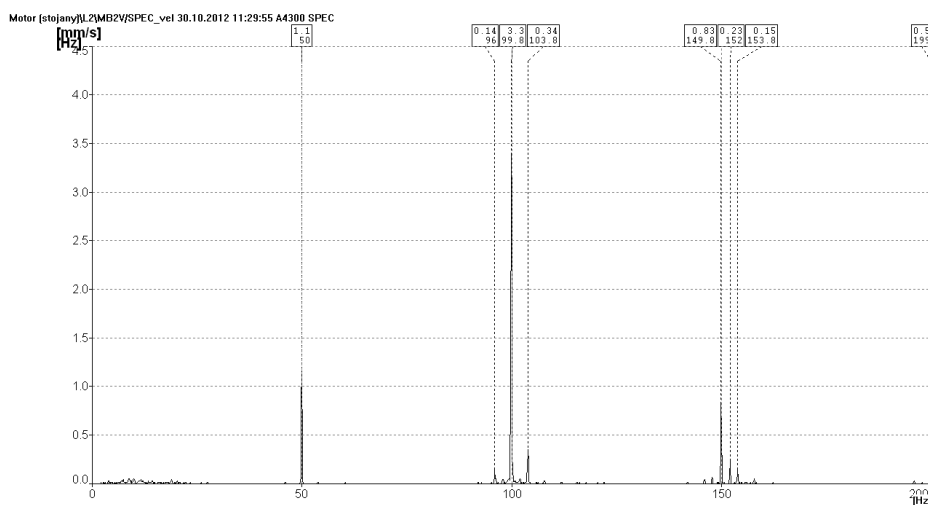


Obr. 48 Graf vertikálních vibrací L2 – vyosený bez zatížení



Obr. 49 Frekvenční spektrum MB2H

Na obr. 49 je frekvenční spektrum rychlosti měřené v bodě MB2 v horizontálním směru, kde dominantní frekvencí je druhá harmonická 100 Hz síťové frekvence. Tato frekvence souvisí s výskytem nesymetrie elektromagnetických polí elektromotoru.



Obr. 50 Frekvenční spektrum MB2V

Na obr. 50 je zobrazeno frekvenční spektrum rychlosti vibrací v bodě MB2 ve vertikálním směru, ve kterém jsou vyznačeny síťová frekvence 50Hz a také 1x a 2x harmonická složka frekvence 100Hz.

7.2 Měření ze dne 31. 10. 2012 – Vyosený postupně zatěžovaný

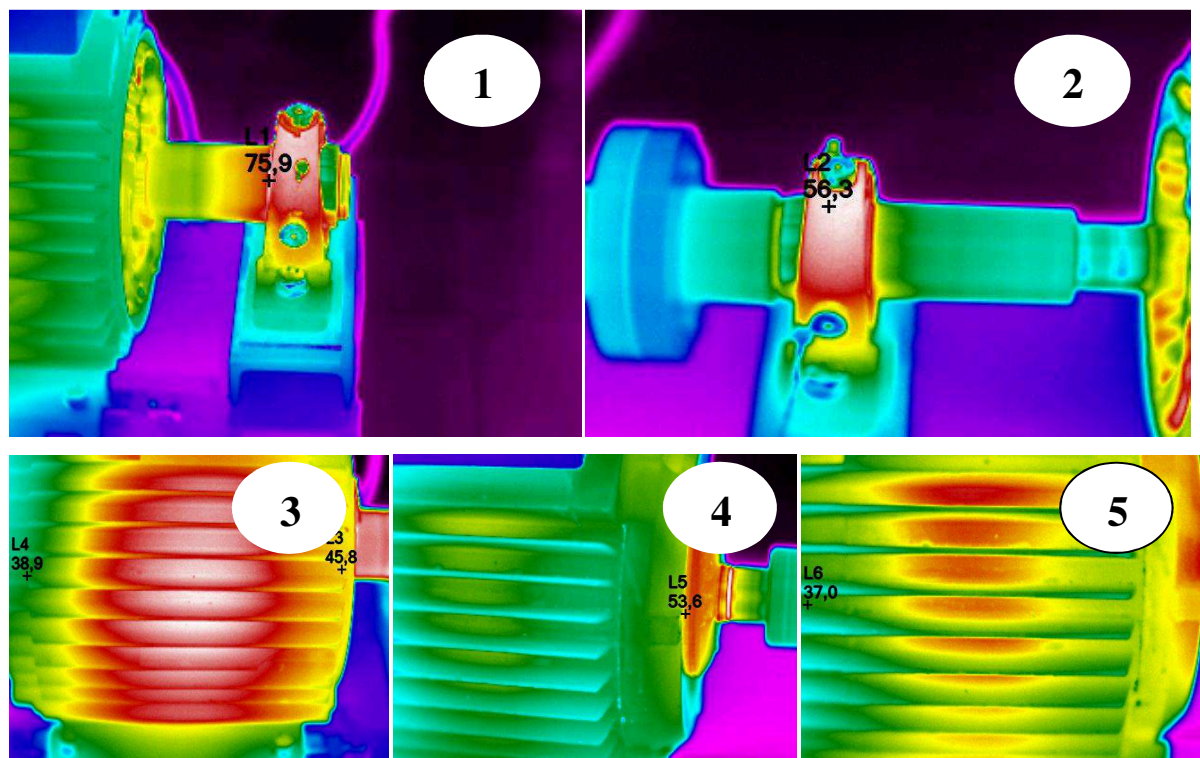
V tab. 6 jsou data z měření, které proběhlo 31. 10. 2012 v režimu vyosený postupně zatěžovaný, u nichž byla nastavena vzduchová mezera 0,2 mm. Pro tento režim měření byl

použit frekvenční měnič, u něhož se postupně v čase po 15 minutách nastavovala frekvence z 50 Hz až na 48,2 Hz, které příslušely následující proudy. Měření probíhalo pomocí klešťového ampérmetru.

Jako další hodnota je teplota v měřicích bode T1 až T6. Měřicí body jsou schématicky zaznamenány na obr. 37. Poslední hodnoty v tabulce jsou celkové hodnoty rychlosti vibrací v měřicích bodech, jež jsou taktéž schématicky zaznačeny v obr. 32.

Tab. 6 31.10.2012 - VPZ - Vyosený postupně zatěžovaný

Frekvence [Hz]	Proudy [A]	Čas	Teploty								
			T1	T2	T3	T4	T5	T6			
50,0	9,9	8:01	53,6	44,8	18,1	15,8	21,3	14,1			
49,7	12,8	8:17	57,4	46,4	23,4	22,8	30,1	20,2			
49,4	16,3	8:33	60,4	47,7	26,7	28	32,9	20,8			
49,1	19,9	8:48	62,1	48,5	31	28,8	37,5	25,1			
48,8	23,2	9:05	65,2	49,2	34,2	29,2	42,2	27,6			
48,5	26,5	9:26	67,3	50,1	41,6	33,7	46,9	27,1			
48,2	29,6	9:44	69,3	50,7	45,6	36,5	53,6	31,2			
Celkové efektivní hodnoty rychlostí vibrací [mm.s ⁻¹]											
MB1H	MB1V	MB2H	MB2V	MB3H	MB3V	MB4H	MB4V	MB5H	MB5V	MB6H	MB6V
5,87	4,56	4,88	2,77	3,2	5,54	2,91	3,55	1,96	2,2	2,01	1,96
3,3	4,36	3,7	1,93	3,01	4,4	2,88	2,79	2,05	2,77	1,7	3,23
3,75	7,82	3,9	4,4	3,29	10,73	3,62	5,57	2,56	5,42	2,81	4,77
3,49	7,36	3,84	4,5	3,29	4,92	3,42	4,28	3,01	3,08	2,12	3,18
3,83	9,12	5,21	3,6	3,49	5,54	6,17	4,14	3,9	4,12	2,53	3,37
4,13	5,14	6,38	4,59	3,9	4,02	3,72	5,1	3,62	2,93	2,51	2,38
4,8	3,07	6,35	4,23	3,73	3,03	3,36	3,57	4,22	2,98	3,62	2,89



Obr. 51 Separovaný model

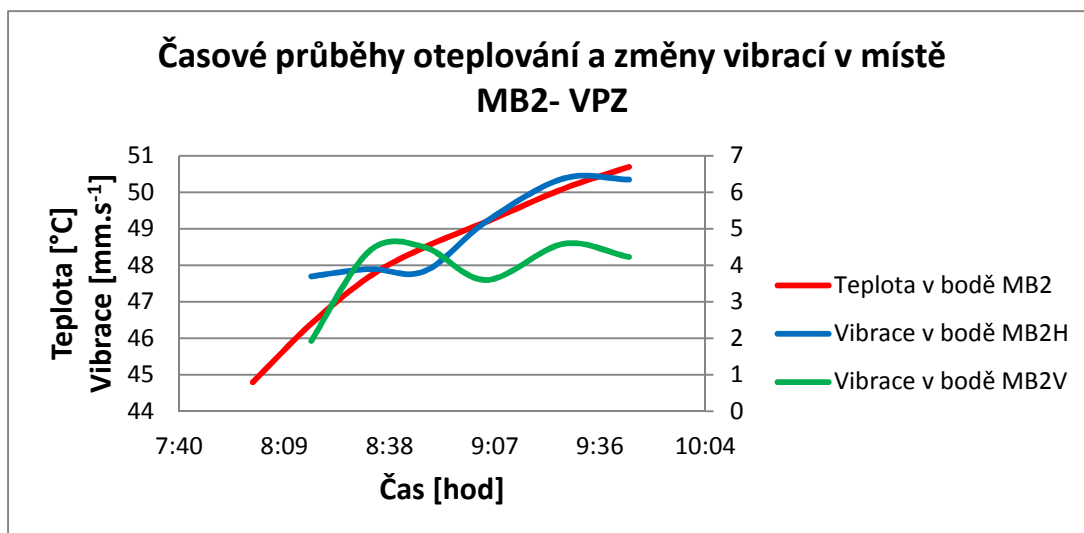
Na termogramech obr. 51 vidíme separovaný model, u něhož byly měřené teploty a teplotní pole. Na obrázku č. 51/ 1 je ložiskový domek L1, který byl zahřátý na teplotu 75,9°C.

Na snímku – termogramu č. 51/ 2 je ložiskový domek s označením L2, kde byla naměřena teplota 56,3°C.

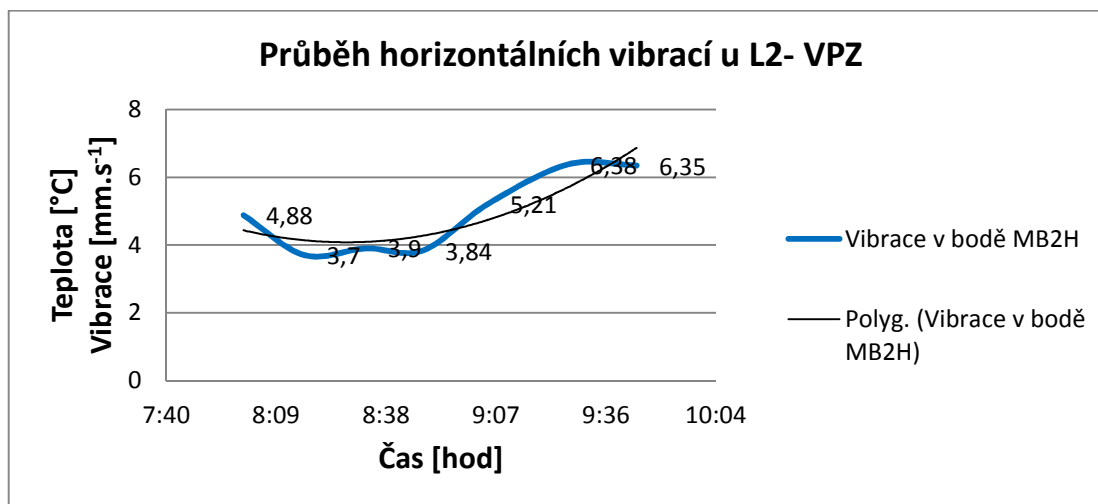
U třetího 51/ 3 snímku je vyfocen elektromotor s označením L3, L4, u něhož se naměřily teploty 45,8°C, resp. 38,9°C. Obrázek č. 51/ 4 – generátor s označením L5 zobrazuje teplotu 53,6°C a snímek 51/ 5 – generátor L6 uvádí teplotu u ventilátoru ve výši 37°C.

Na obr. 52 je znázorněn graf s časovým průběhem oteplování a změnami vibrací v horizontální a vertikální rovině v režimu vyosený postupně zatěžovaný. Obr. 53 graficky separovaně zobrazuje průběh horizontálních vibrací proložený polynomicou křivkou.

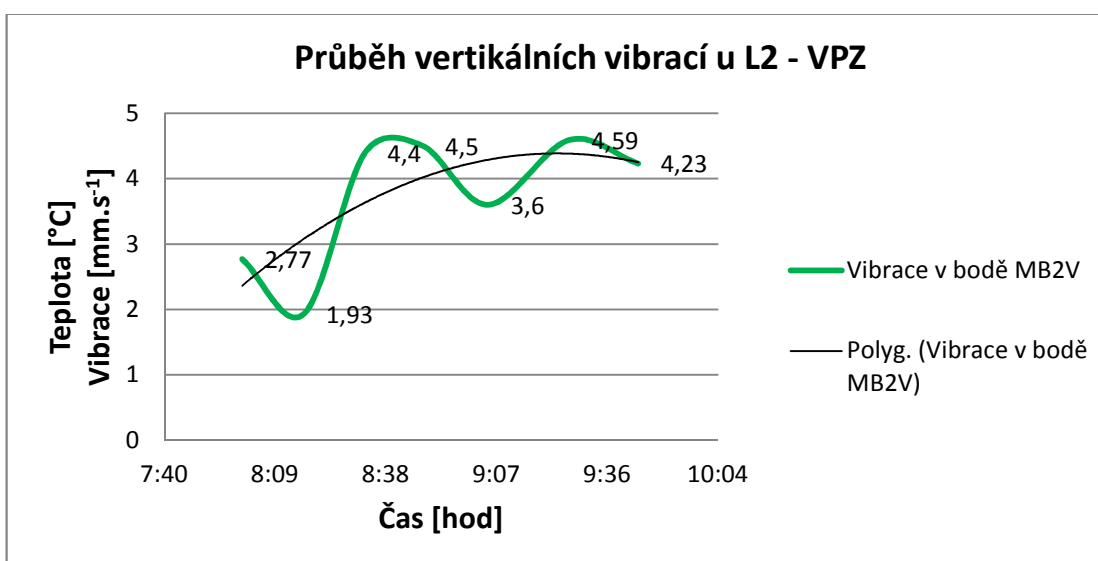
Obr. 54 opět separovaně zobrazuje průběh vibrací, tentokrát ovšem ve vertikálním směru, a taktéž proložený polynomicou křivkou.



Obr. 52 Graf průběhu oteplování L2 – vyosený postupně zatěžovaný



Obr. 53 Graf horizontálních vibrací na L2 - vyosený postupně zatěžovaný



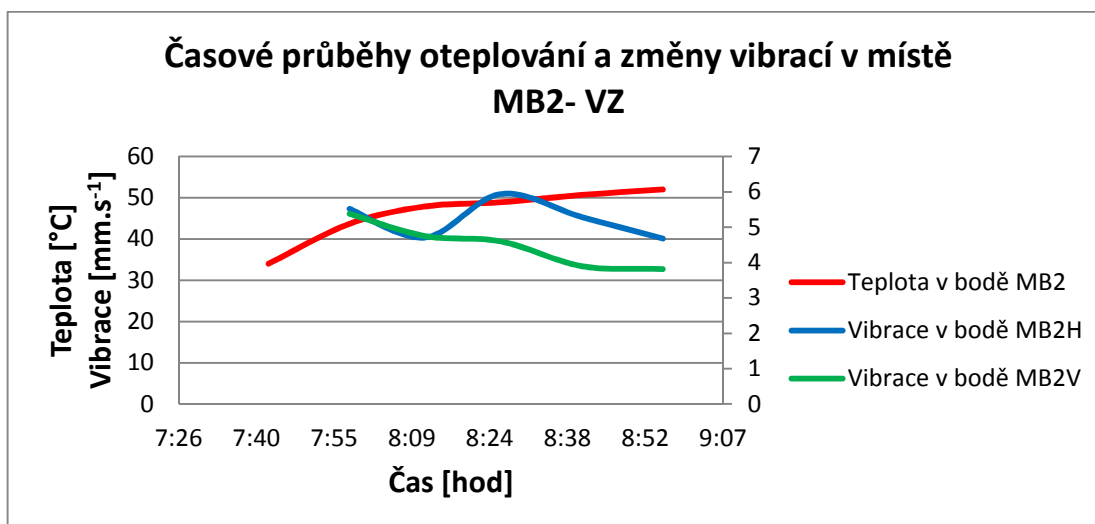
Obr. 54 Graf vertikálních vibrací na L2 – vyosený postupně zatěžovaný

7.3 Měření ze dne 1. 11. 2012 – Vyosený zatížený (konstantně)

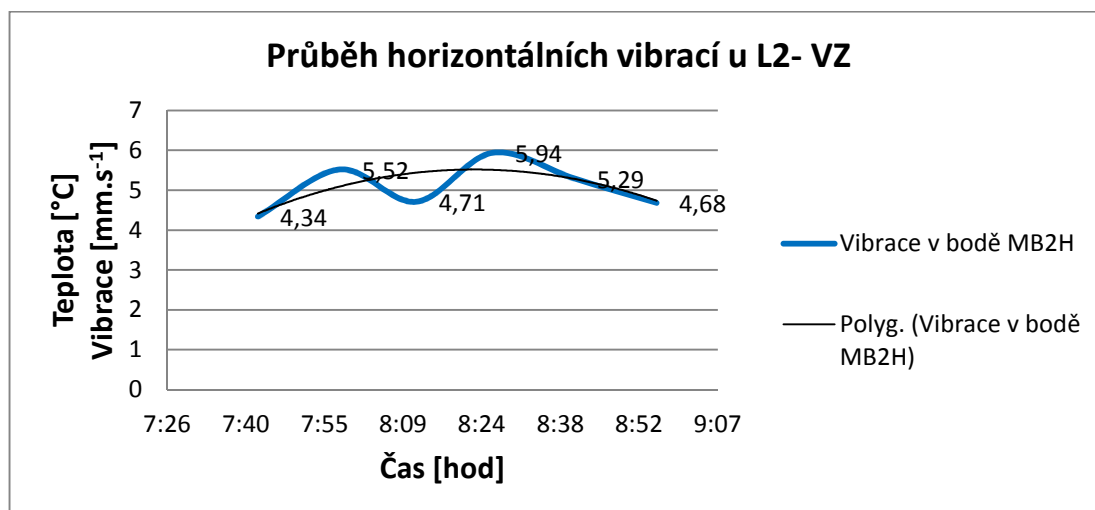
V tab. 7 jsou data z měření, které proběhlo 1. 11. 2012 v režimu vyosený zatížený konstantně. To znamená, že byla opět nastavena vzduchová mezera na hodnotu 0,2 mm a zatížení bylo nastaveno na 48,8 Hz. Během celého měření se měřily proudy pomocí klešťového ampérmetru v příslušném čase a ve stejném okamžiku bylo snímáno i teplotní pole celého soustrojí.

Tab. 7 1.11.2012 - VZ - Vyosený zatížený (konst.)

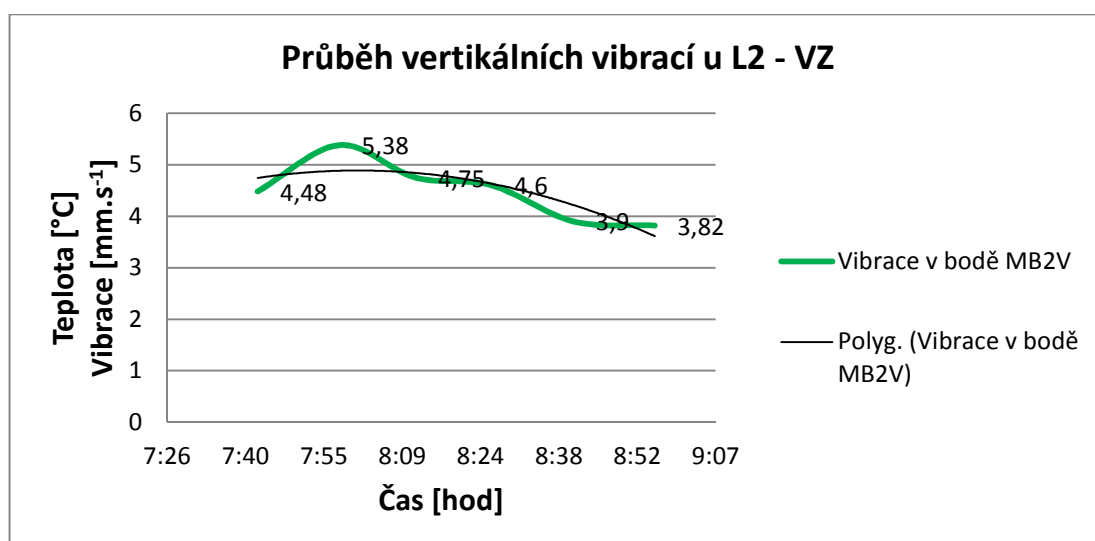
Frekvence [Hz]	Proudy [A]	Čas	Teploty								
			T1	T2	T3	T4	T5	T6			
48,8	27,3	7:43	31,4	34	12,1	12,5	16,5	13,6			
48,8	24,8	7:58	51,5	43,7	19,9	19,2	25,6	18,1			
48,8	23,7	8:12	60,2	47,9	31,5	28,5	42,5	23,3			
48,8	22,9	8:26	64,5	48,9	35,1	33,5	50,9	28,4			
48,8	22,7	8:41	65,7	50,7	39,4	38,9	53,9	28,8			
48,8	22,5	8:56	67,3	52	39,3	39,5	56,4	30,9			
Celkové efektivní hodnoty rychlostí vibrací [mm.s ⁻¹]											
MB1H	MB1V	MB2H	MB2V	MB3H	MB3V	MB4H	MB4V	MB5H	MB5V	MB6H	MB6V
4,16	4,8	4,34	4,48	4,01	6,48	3,78	5,07	3,32	6,18	2,92	3,03
4,67	7,06	5,52	5,38	3,51	5,48	3,78	4,18	3,17	3,87	2,88	2,7
4,68	4,81	4,71	4,75	3,36	5,97	3,53	3,78	3,37	3,44	2,68	3,52
4,2	4,74	5,94	4,6	3,45	7,02	3,34	5,35	3,09	3,79	2,13	3,57
4,05	4,88	5,29	3,9	3,35	5,77	3,48	5,79	3,34	3,98	2,46	3,43
4,84	4,42	4,68	3,82	3,41	4,67	3,6	4,81	3,19	5,37	2,78	2,67



Obr. 55 Graf průběhu oteplování L2 – vyosený zatížený



Obr. 56 Graf horizontálních vibrací na L2 - vyosený zatížený



Obr. 57 Graf vertikálních vibrací na L2 – vyosený zatížený

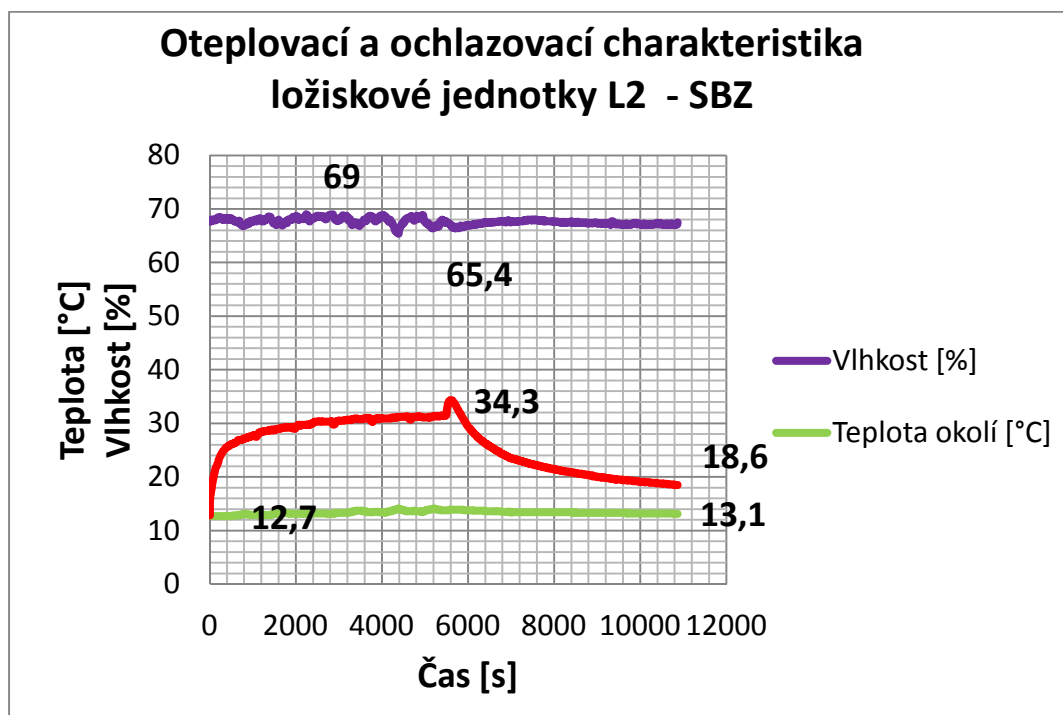
7.4 Měření ze dne 6. 11. 2012 – Souosý bez zátěže

V tab. 8 jsou uvedena data v režimu měření souosý bez zátěže, které proběhlo 6. 11. 2012. Režim souosý bez zátěže značí, že jsme srovnaly rotor vůči statoru a odstranili vzduchovou mezeru 0,2 mm na 0 mm.

Tab. 8 6.11.2012 - SBZ - Souosý bez zátěže

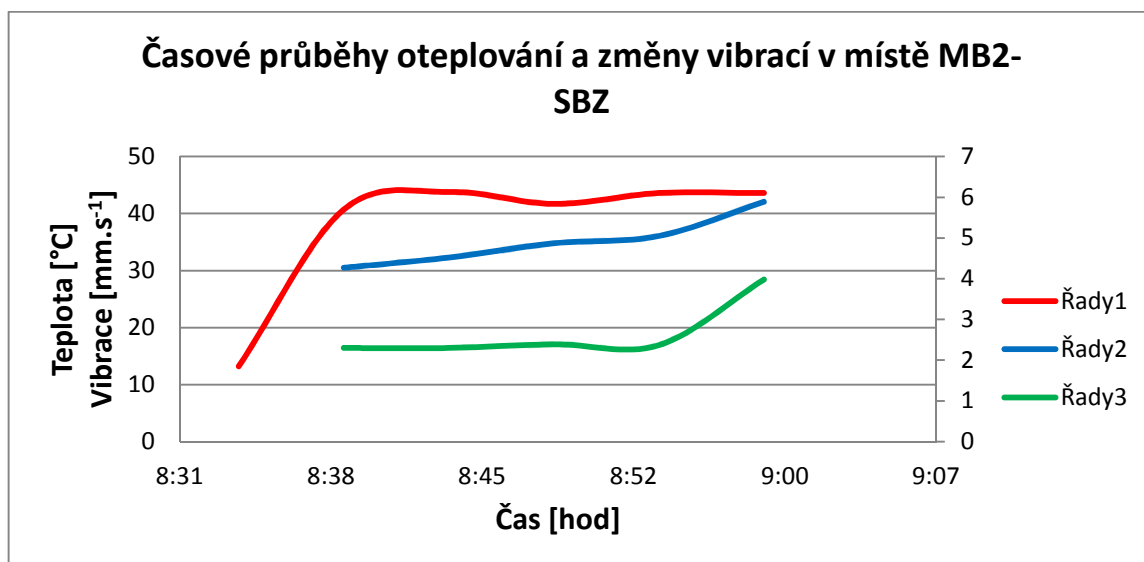
Frekvence [Hz]	Proudy [A]	Čas	Teploty								
			T1	T2	T3	T4	T5	T6			
50,0	12,8	8:34	14,1	13,2	14	13,6	13,8	13,8			
50,0	12,8	8:39	41,3	40,7	14,8	14,9	23,3	15,4			
50,0	12,8	8:44	46,3	43,8	17,3	17,2	27,1	16,3			
50,0	12,8	8:49	50,8	41,7	20,9	18,6	28,5	17,6			
50,0	12,8	8:54	52,5	43,6	22	19,5	29,4	17,3			
50,0	12,8	8:59	55,6	43,6	23,6	21,8	35,4	19,5			
Celkové efektivní hodnoty rychlostí vibrací [mm.s ⁻¹]											
MB1H	MB1V	MB2H	MB2V	MB3H	MB3V	MB4H	MB4V	MB5H	MB5V	MB6H	MB6V
3,74	3,33	5,61	3,77	5,76	4,12	3,03	3,3	2,25	2,47	2,09	1,89
3,79	4,52	4,27	2,3	2,36	3,61	5,41	3,05	2,03	2,46	1,82	2,06
3,15	3,79	4,52	2,3	2,84	4,07	2,63	3,57	2,09	3,24	1,82	2,54
3,27	4,76	4,87	2,39	2,49	4,34	2,56	3,04	2,02	3,82	1,82	3,65
3,35	5,46	5,05	2,37	3,13	4,86	2,71	3,66	2,16	4,77	1,83	4,55
3,55	5,72	5,89	3,98	2,6	5,43	2,87	4,02	2,14	5,46	1,8	4,26

Výsledky z teploměru Tepcel jsou zpracovány v grafech pro ložiskový domek označovaný L2.

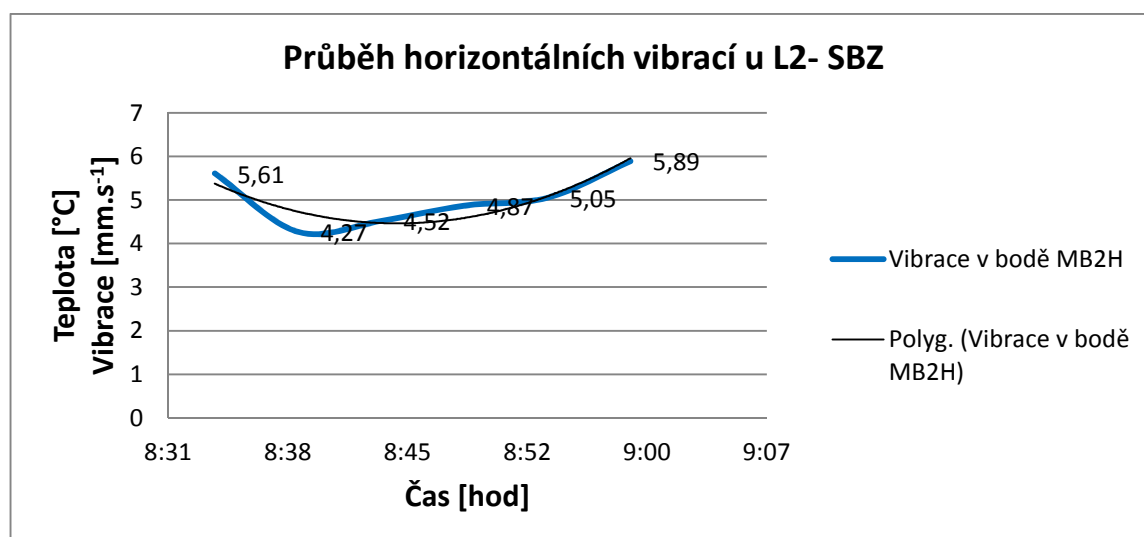


Obr. 58 Graf oteplovací a chládnoucí charakteristiky ve stavu SBZ

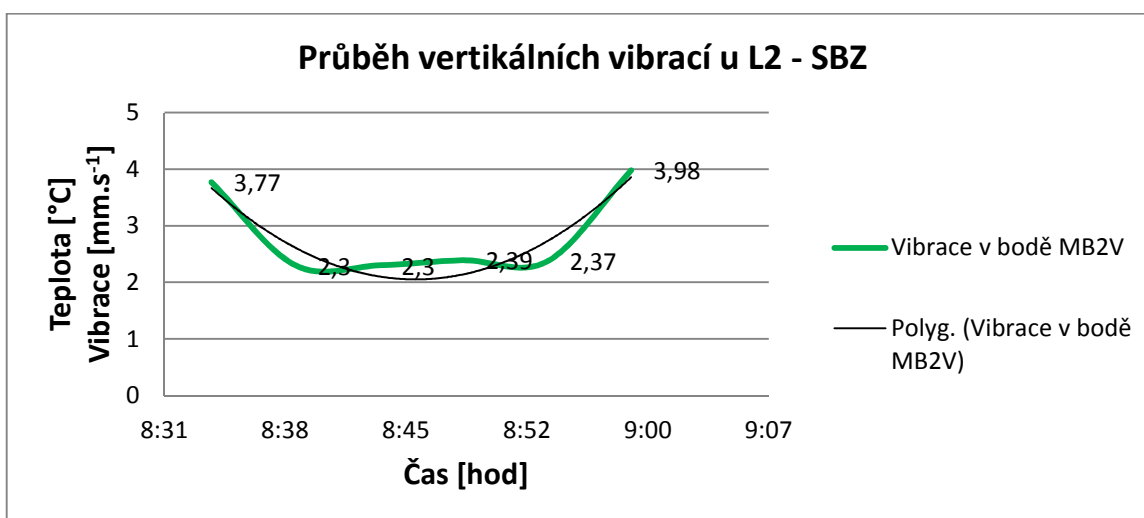
Graf na obr. 58 popisuje vlhkost okolí, která se pohybovala v rozmezí 65,4% – 69%. U teploty okolí byly zjištěny hodnoty v rozmezí 12,7°C – 13,1°C. Pro analýzu byla nejdůležitější hodnota přímo měřena na ložiskové jednotce, a to od počáteční hodnoty pohybující se od 12,7°C do 34,3°C. Následným ochlazováním ložiskové jednotky došlo ke snížení její teploty až na 18,6°C. Všechny ostatní grafy z měření jsou uvedené v přílohách.



Obr. 59 Graf průběhu oteplování L2 – souosý bez zatížení



Obr. 60 Graf horizontálních vibrací na L2 - souosý bez zatížení



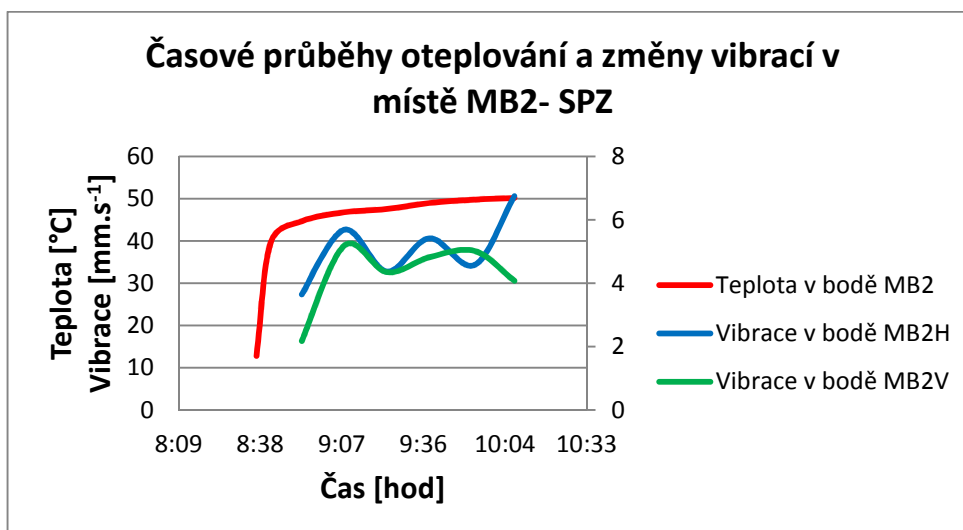
Obr. 61 Graf vertikálních vibrací na L2 – souosý bez zatížení

7.5 Měření ze dne 7. 11. 2012 – Souosý postupně zatěžovaný

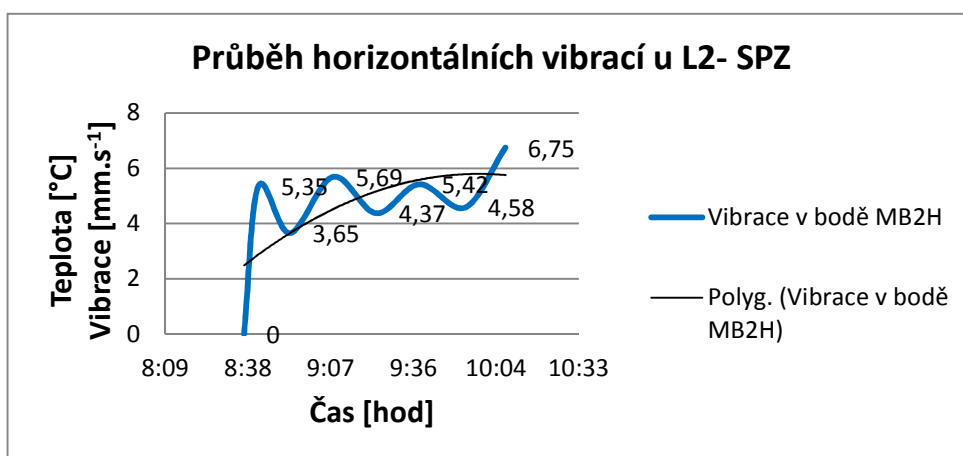
Naměřená data v režimu souosý postupně zatěžovaný jsou uvedena v tab. 9. Podmínky při měření byly nastaveny na nulovou vzduchovou mezeru rotoru vůči statoru a následně se v čase snímala teplota a vibrace. Během měření se za pomoci frekvenčního měniče měnila frekvence z 50Hz až na 48,2Hz při souběžném měření proudů klešťovým ampérmetrem. Jako další jsem snímala teplotní pole celého soustrojí infračervenou termografickou kamerou, dále teplotu na ložisku L2, teplotu okolí a vlhkost okolí dotykovým teploměrem. Poslední měřenou složkou na experimentálním modelu byly vibrace v horizontální a vertikální rovině.

Tab. 9 7.11.2012 - SPZ - Souosý postupně zatěžovaný

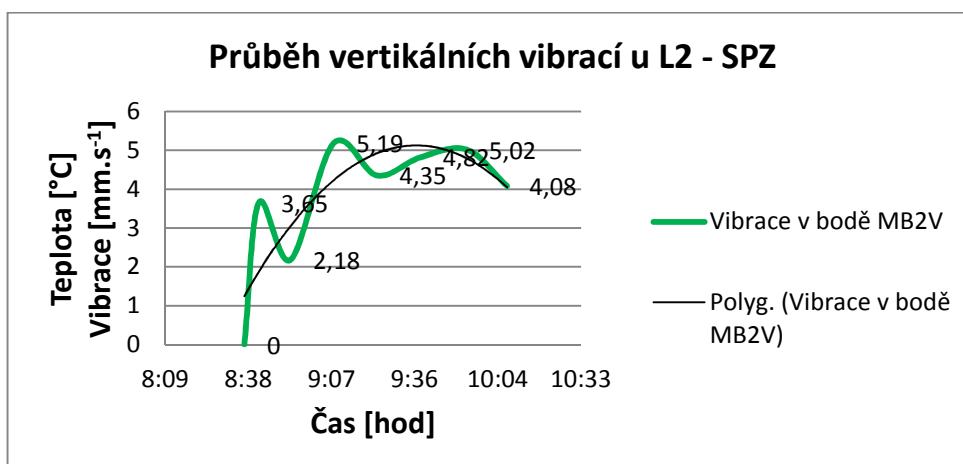
Frekvence [Hz]	Proudy [A]	Čas	Teploty								
			T1	T2	T3	T4	T5	T6			
50,0	9,5	8:42	40,8	39,6	15,2	14,8	28,6	14,9			
49,7	10,8	8:53	49,7	44,7	19,8	20,9	32,6	16,7			
49,4	13,5	9:08	56,1	46,8	26,2	24,2	38,5	20,7			
49,1	15,8	9:23	60	47,6	33,4	27,3	42,4	25,3			
48,8	18,7	9:38	62,2	49	31,5	29,9	45,9	26,7			
48,5	21,4	9:54	63,2	49,8	39	31,5	49,8	29,1			
48,2	24,1	10:08	64,4	50,2	37	35	54	30,3			
Celkové efektivní hodnoty rychlostí vibrací [mm.s ⁻¹]											
MB1H	MB1V	MB2H	MB2V	MB3H	MB3V	MB4H	MB4V	MB5H	MB5V	MB6H	MB6V
3,36	3,91	5,35	3,65	2,63	4,01	2,94	3,09	2,12	2,44	2,1	1,93
3,19	4,83	3,65	2,18	2,71	5,06	2,62	3,05	2,11	2,89	1,9	3,31
4,51	7,77	5,69	5,19	2,86	8,19	3,15	6,39	2,5	6,48	2,62	4,97
3,38	5,25	4,37	4,35	2,66	4,2	2,69	3,6	2,51	2,97	2,28	4,04
3,8	4,2	5,42	4,82	2,77	4,57	2,68	3,95	3,17	4,69	2,67	4,1
3,71	4,88	4,58	5,02	2,86	4,95	3,09	3,96	3,17	3,29	2,86	3,64
4,74	3,47	6,75	4,08	3,1	2,46	3,33	3,46	3,33	2,87	3,65	2,35



Obr. 62 Graf průběhu oteplování L2 – souosý postupně zatěžovaný



Obr. 63 Graf horizontálních vibrací na L2 - souosý posupně zatěžovaný



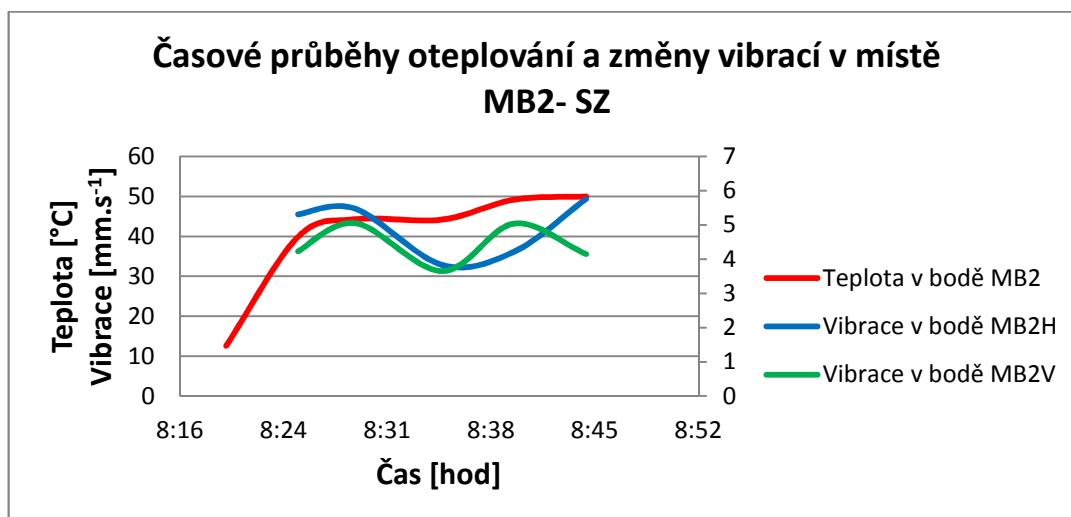
Obr. 64 Graf vertikálních vibrací na L2 – souosý posupně zatěžovaný

7.6 Měření ze dne 8. 11. 2012 – Souosý zatížený (konstantně)

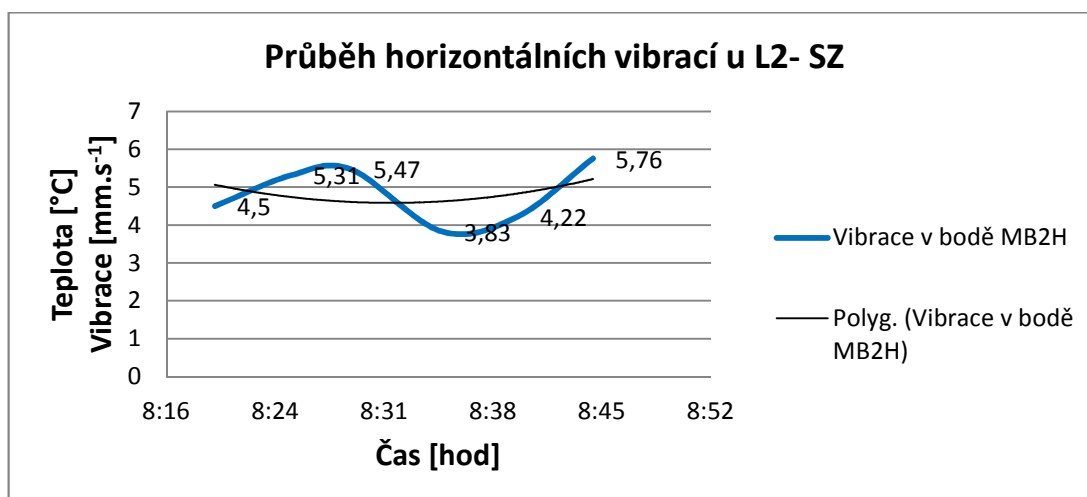
Měření v tab. 10 probíhalo v režimu souosém zatíženém konstantně na frekvenci 48,8 Hz, přičemž byly sledovány proudy, teplotní pole, teploty na L2 a vibrace celého soustrojí.

Tab. 10 8.11.2012 - SZ - Souosý zatížený (konst.)

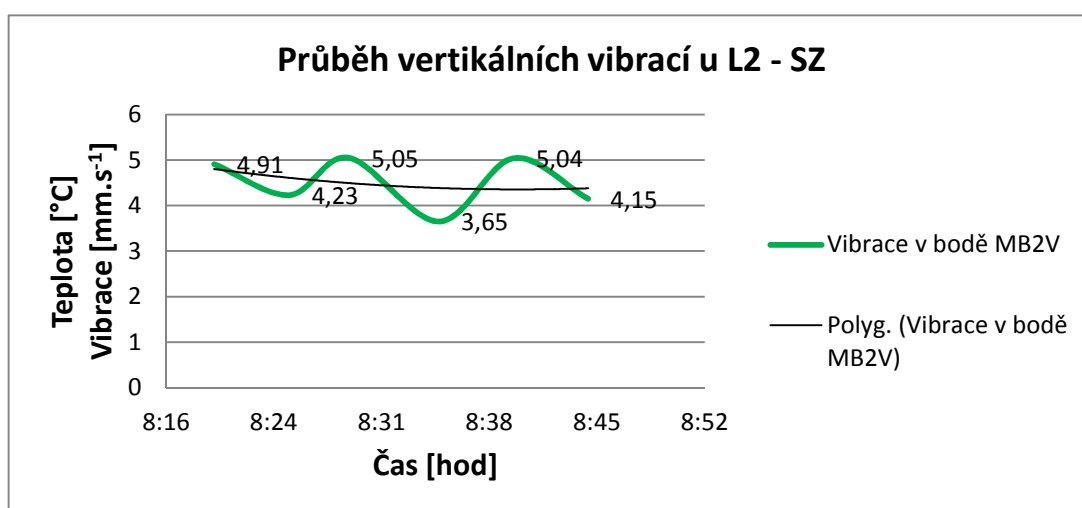
Frekvence [Hz]	Proudy [A]	Čas	Teploty								
			T1	T2	T3	T4	T5	T6			
48,8	23,8	8:20	12,3	12,6	12,5	12,5	12,9	12,6			
48,8	23,2	8:25	41,4	39,9	15,3	15,9	29,7	29,7			
48,8	22,1	8:29	49,8	44,3	18,7	19	37,3	20,2			
48,8	21,6	8:35	51	44,2	23,7	24,7	37,5	20,9			
48,8	21,1	8:40	57,6	49,2	26,8	24,3	43,4	22,7			
48,8	21	8:45	59,6	50	31,9	27,9	46,6	26,4			
Celkové efektivní hodnoty rychlostí vibrací [mm.s ⁻¹]											
MB1H	MB1V	MB2H	MB2V	MB3H	MB3V	MB4H	MB4V	MB5H	MB5V	MB6H	MB6V
3,95	5,21	4,5	4,91	2,8	4,82	2,4	3,52	3,11	5,49	2,5	4,34
3,67	5,35	5,31	4,23	2,84	5,3	4,45	5,09	3,22	3,72	2,58	3,35
4,06	5,88	5,47	5,05	2,61	5,64	2,73	3,32	2,91	3,31	2,53	4,4
3,21	5,23	3,83	3,65	2,77	3,21	2,91	4,81	3,31	5,15	2,32	3,74
4,41	4,05	4,22	5,04	2,77	4,58	3,02	4,67	2,89	5,7	2,32	4,49
3,63	5,3	5,76	4,15	2,95	6,58	2,71	7,25	3,28	4	2,38	3,95



Obr. 65 Graf průběhu oteplování L2 – souosý zatížený



Obr. 66 Graf horizontálních vibrací na L2 - souosý zatížený



Obr. 67 Graf vertikálních vibrací na L2 - souosý zatížený

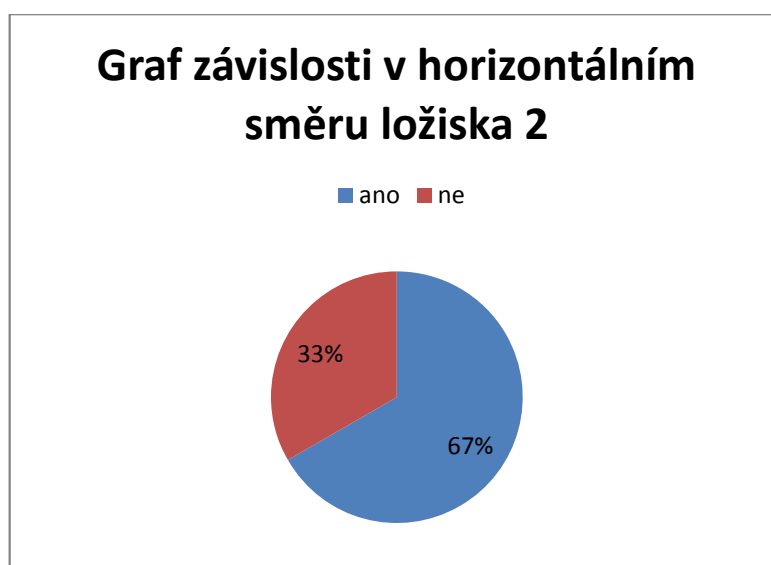
V následující tabulce je provedeno celkové zhodnocení všech režimů měření na ložisku L2, u nichž byly zjišťovány závislosti vibrací na teplotě.

Tab. 11 Přehled rostoucích (ANO), klesajících (NE) vibrací v závislosti na teplotě

	horizontální směr	vertikální směr
VBZ	NE	ANO
VPZ	ANO	NE
VZ	NE	NE
SBZ	ANO	ANO
SPZ	ANO	NE
SZ	ANO	NE

Tab. 12 Zhodnocení

	horizontální směr		vertikální směr
ano	4	ano	2
ne	2	ne	4



Obr. 68 Graf závislosti v horizontálním směru L2



Obr. 69 Graf závislosti ve vertikálním směru L2

Na uvedených kruhových diagramech jsou celkově zhodnoceny všechny výsledky měření závislosti teploty na vibracích u pohonných jednotek v horizontálním a vertikálním směru, u nichž můžeme uvést, že závislost teploty na vibracích se potvrdila v horizontálním směru měření na 67%, u vertikálního měření na 33%.

Tím se ověřila a také potvrdila skutečnost uvedená v technických zprávách zpracovaných u firmy Hudeczek Service, že při analýze havárií ložisek velkých strojů, což potvrzují i výpovědi obsluhy těchto strojů, se ve většině případů stroje uklidnily a při nárůstu teplot strojů a jejich ložisek se vibrace začaly snižovat.

8 Konkrétní závěry pro realizaci v praxi

V experimentální laboratoři u firmy Hudeczek Service byla provedena řada náročných měření, u nichž jsem měřila teplotní pole celého soustrojí, teploty na ložiskách, vibrace rychlosti a zrychlení a vlhkost okolí. Měření byla časově velmi náročná a po celou dobu byly zachovávány stejné podmínky. Veškerá naměřená data byla následně analyzována a zpracována. Všechny výsledky jsou uvedeny v přílohách s výjimkou ložiska L2, které je jako demonstrační příklad uvedeno v práci. Celkové zhodnocení všech výsledků měření závislosti teploty na vibracích u pohonných jednotek je provedeno v horizontální i vertikální rovině ložiska. Orientačně jsou výsledky prezentovány kruhovými diagramy. Z diagramů je zřejmé, že závislost teploty na vibracích se potvrdila v horizontálním směru měření na 67%. Tyto zjištěné hodnoty při nárůstu teploty ložisek rostly polynomicou závislostí. U vertikálního směru měření se polynomicá závislost prokázala na 33%. Ze zjištěných výsledků vyplývá, že neexistuje jednoznačný vztah mezi teplotou a vibracemi.

Prioritním cílem práce bylo potvrdit nebo vyvrátit rozšířený, avšak nepodložený názor, že teplota u točivých strojů je přímo úměrná růstu vibrací. Na základě získaných a vyhodnocených výsledků lze konstatovat, že hlavní cíl disertační práce definovaný v kap. 3. Hlavním cílem disertační práce je tedy laboratorní ověření vzájemné interakce těchto fyzikálních veličin a vytvoření databáze, což by potvrdilo nebo vyvrátilo uvedený názor, byl splněn.

Předložená disertační práce je původní a je nutné ji považovat za práci základní, která vytváří podmínky pro další měření, zejména přímo v provozních podmínkách k získání dalších poznatků a vytvoření databáze sledovaných závislostí.

- ◆ Pro uvedení experimentálního modelu do provozu byl použit frekvenční měnič, jehož pomocí byl vyvolán brzdňý moment na hnacím elektromotoru, a to snížením napájecí frekvence sítě brzdňého elektromotoru.

Použití frekvenčního měniče bylo dáno těmito důvody:

- při daných výkonech, délkách měření a počtech jednotlivých měření by všechny ostatní systémy založené na maření kinetické energie brzdami byly neuchladitelné a s enormním opotřebením brzdňých obložení,
- laboratoř byla tímto frekvenčním měničem již vybavena,
- komfort měření,

- ekologické a ergonomické aspekty práce.

- ♦ Zásadní rozdíl mezi horizontálními a vertikálními vibracemi je dán především tuhostí uložení a tuhostí celého zařízení. Nebude-li mít základový rám stroje dostatečnou tuhost, může docházet při chodu stroje k jeho rozkmitání v obou směrech působení maximálních dynamických zatížení. Při těchto experimentálních měření se vychází z takových směrů a hledá se extrém. U běžně provozovaných strojů v průmyslu a ostatních odvětví je rozdíl naměřených hodnot mezi horizontálním a vertikálním směrem vždy odlišný.

Vibrace jsou vyvolávány u točivých strojů několika faktory (nevývaha, nesouosost, opotřebení ložisek, nesymetrie elektromagnetického pole atd.) a jejich velikost je dána tuhostí uložení a tuhostí celého zařízení. Vertikální vibrace jsou přímo ovlivněny tuhostí základu a uložení konstrukce na tomto základu. Vibrace horizontální ovlivňuje přímo tuhost uložení konstrukce na základu a výška těžiště stroje. Vyloučila jsem vibrace, které by se mohly dostat do vlastní frekvence soustavy stroje.

- ♦ Vliv oteplení elektromotoru na oteplení ložisek – tento jev nastává u všech strojů, které jsou provozovány v průmyslu, akceptovali jsme tyto podmínky pro tyto měření, abychom se přiblížili realitě.
- ♦ Na základě teoretické analýzy provozování točivých strojů, provozních teplot a provozních vibrací jsem definovala cíle disertační práce a od kapitoly 4. je vše mou vlastní prací.

Navrhla jsem metodiku měření, harmonogram zkoušek, tyto zkoušky jsem realizovala a následně provedla analýzu měření a objektivní vyhodnocení.

9 Závěr práce a doporučení pro další postup ve výzkumu a vývoji

Disertační práce řeší problematiku stanovení závislosti teploty na vibracích pohonných jednotek. Moderní požadavky předcházení poruch strojů diagnostickými metodami vyžadují řadu informací pro sledování technického stavu na straně jedné a jejich správné a objektivní vyhodnocení na straně druhé. Proto je v této práci řešen jeden z mnoha problémů – interakce dvou veličin a možnost nalezení jednoznačné závislosti.

Na zřízeném experimentálním pracovišti u firmy Hudeczek Service byla provedena celá řada náročných experimentálních měření, během kterých byly zachovány stejné podmínky v celé experimentální laboratoři, v níž byly měřeny u celého soustrojí teplotní pole, teploty na ložiskách, vibrace rychlosti, vibrace zrychlení a vlhkost okolí. Po ukončení měření byla veškerá naměřená data analyzována a následně zpracována.

Z celkové analýzy dat vyplývá, že neexistuje jednoznačný vztah mezi teplotou a vibracemi. Veškeré výsledky z měření jsou uvedeny v přílohách níže uvedených s výjimkou ložiska L2, které je uvedené v práci. Celkové zhodnocení všech výsledků měření závislosti teploty na vibracích u pohonných jednotek je provedeno v horizontálním i vertikálním směru ložiska. Pro rychlou orientaci jsou výsledky demonstrovány kruhovými diagramy, z kterých vyplývá, že závislost teploty na vibracích se potvrdila v horizontálním směru měření na 67%. Tyto zjištěné hodnoty při nárůstu teploty ložisek rostly polynomickou závislostí. U vertikálního směru měření se polynomická závislost prokázala na 33%.

Předložená disertační práce je původní a vytváří podmínky pro další měření zejména přímo v provozních podmínkách. Přínos této práce se promítá do oblasti provozní, aplikovaného výzkumu i do oblasti pedagogické. Aplikovaný výzkum je obohacen o nové poznatky z analýzy interakce teploty a vibrací. V oblasti pedagogické se k využití nabízí:

- ♦ orientační přehled výzkumů v oblasti laboratorních měření,
- ♦ implementace nových poznatků do výuky technické diagnostiky,

Má disertační práce je prací v oblasti zjišťování vzájemné interakce teploty a vibrací na ložiskách točivého stroje v laboratorních podmínkách o výkonu 15 kW. Pro využití v provozní praxi jsou k dispozici závěry:

- ◆ Výsledek mé práce jednoznačně stanovil, že teploty na ložiskách točivých strojů a jejich vibrace nejsou vždy přímo závislé, tedy jen rostou nebo jen klesají, přičemž druhá veličina roste.
- ◆ Je to jednoznačný výsledek, který opravuje názor, že vždy s rostoucí teplotou rostou i vibrace.
- ◆ Při konstrukčních, projekčních, montážních a provozních činnostech lze výsledek disertační práce jednoznačně aplikovat na veškeré točivé stroje, přičemž v průběhu zkušebního provozu těchto strojů jsou nutné patřičné korekce s ohledem na prostory a prostředí, na druh použitých ložisek a také nutno vzít v úvahu výkon strojů, jejich uložení a především kvalitu základů a základového rámu. Nelze do detailů předpokládat vliv prostředí a prostorů na nově namontovaný stroj a taktéž u strojů, které jsou provozovány ne vždy aspekty prostředí a prostorů pozitivně působí na stroj, a proto je třeba vždy provést při zkušebním provozu patřičnou korekci nastavených hodnot spolupůsobení vibrací ložisek a jejich teploty. Z protokolů firmy Hudeczek Service, s.r.o. Albrechtice o provedených montážích a opravách většinou po haváriích rotačních strojů o výkonech v řádech MW vyplývá, že bylo nutné při zkušebním provozu provést korekci nastavení upozorňujících hodnot vibrací nebo chvění. Každý velký točivý stroj je originálem a taktéž jeho montáž na pracovním stanovišti montážní firmou je jiná byť by měla být stejná. Někdy nadměrné chvění nebo teplota jsou provozními hodnotami stroje a nedá se tyto nepříznivé hodnoty snížit technickou úpravou jednotlivých elementů n.p. vyvážením, nastavením souososti, zaškrabáním ložisek a tím vytvoření menších vůlí v ložiskách. Výsledek mé disertační práce, tyto provozní zkušenosti potvrzuje laboratorními zkouškami.
- ◆ Výsledek slouží jako podklad pro tvorbu a připomínky příslušných norem, návodů pro obsluhu a údržbu konkrétních strojů, včetně návodů pro analýzu diagnostických měření. Monitorování strojů lze rozdělit do třech skupin a to:
 - Vizuální kontrola obsluhou, během níž obsluha prohlídkou a nasloucháním zjišťuje stav stroje. Většinou teploty ložisek jsou měřeny a některé organizace vybavují své obsluhy jednoduchým přístrojem pro měření vibrací. Do návodů pro obsluhu a údržbu nutno doplnit, aby obsluhy byly

vybaveny zařízením k jednoduchému měření vibrací a všechny stroje na svých ložiscích byly vybaveny měřením teplot. Naměřené hodnoty musí být zapisovány do knihy kontrol. Na základě výsledků mé práce tyto hodnoty musí být posuzovány.

- Kontrola strojů metodou off-line. Metoda je založena na trendovém měření vibrací v určitých intervalech a pomocí spektrální analýzy se vyhodnocuje stav stroje z hlediska jeho spolehlivosti a bezpečnosti pro pracovníky. Doposud není při měření ve většině případů monitorována teplota ložisek. Toto nutno zavést do metodiky měření off-line a vyhodnocovat dle výsledků mé práce.
- Další metodou zjišťování technického stavu točivých strojů je metoda on-line. Na strojích je kontinuálně ve většině případů měřeno jejich chvění a jsou nastaveny hodnoty vibrací, které upozorňují obsluhu vizuálně a akusticky na hodnoty, při kterých je stroj automaticky zastaven, jde-li to z technologických důvodů. Systém on-line je nutné doplnit o kontinuální měření teplot a automatické vyhodnocování naměřených výsledků podle závěrů mé práce.
- ♦ při řešení údržby pomocí bezdemontážní technické diagnostiky a hlídání strojů pomocí technické diagnostiky on-line je výstup mé práce značným přínosem pro analýzu zjištěných stavů kontrolními systémy on-line nebo off-line.

Disertační práce je základem pro další výzkum a následné provozní měření in-situ v oblasti točivých strojů, a to především pro zjišťování teplot a vibrací.

10 Conclusion of the dissertation and recommendations for next steps in research and development

The dissertation deals with issues of determining the temperature dependence of vibrations of drive units. Modern requirements to prevent machine failures using diagnostic methods require a large amount of information for monitoring technical condition on the one hand and its proper and objective assessment on the other hand. Therefore, this dissertation solves one of many problems – the interaction of two variables and the possibility of finding their clear dependence.

The established experimental workplace at the company Hudeczek Service took a large number of exacting experimental measurements, during which the same conditions were kept throughout the experimental laboratory, in which temperature fields, bearing temperatures, speed vibrations, acceleration vibrations, and ambient humidity were measured for an entire machine set. After the completion of measurement, all measured data were analyzed and then processed.

The overall analysis of the data shows that there is no clear relationship between temperature and vibrations. All measurement results are given in the annexes mentioned below, with the exception of bearing L2, which is mentioned in the dissertation. The overall evaluation of the measurement results of the temperature dependence of vibrations for drive units is carried out in both the horizontal direction and the vertical direction of a bearing. For quick reference, the results are presented as circular diagrams, which show that the temperature dependence of vibrations was confirmed to be 67 % in the horizontal direction of measurement. These values observed increased with polynomial dependence when the bearing temperature increased. For the vertical direction of measurement, polynomial dependence proved to be 33 %.

The dissertation presented is original and creates conditions for further measurement especially right in operating conditions. The contribution of this dissertation is reflected in the operating area, applied research, and the educational area. Applied research is enriched by new findings from the analysis of the interaction of temperature and vibrations. As far as the educational area is concerned, the following use is possible:

- ◆ A brief overview of research in the field of laboratory measurement.
- ◆ Implementation of new knowledge in the teaching of technical diagnostics.

My dissertation is a work in the area of determining the interaction of the bearing temperature and vibrations of a rotating machine with a power of 15 kW in laboratory conditions. The following conclusions are available to be used in operating practice:

- ◆ The result of my dissertation clearly determined that rotating machine bearing temperatures and vibrations are not always directly dependent, i.e. they increase only or decrease only, while the other variable increases.
- ◆ This is a clear result which corrects the opinion that also vibrations always increase when the temperature increases.
- ◆ During construction, design, installation and operating activities the result of the dissertation can clearly be applied to any rotating machines; during the trial operation of these machines proper corrections are necessary with regard to the premises and environment and the kind of the bearings used and also the power and bearing of the machines and especially the quality of the foundation and the base frame must be taken into account. The influences of the environment and the premises on a newly installed machine cannot be assumed in detail and also in the case of machines that are operated aspects of the environment and of the premises do not always have a positive effect on the machine and therefore it is always necessary to make proper corrections of the set values of the interaction of the bearing vibrations and temperature during the trial operation. It follows from records of Hudeczek Service, s.r.o., Abrechtice, concerning installation and repairs carried out mostly after breakdowns of rotating machines with a power in the order of MW that corrections of the vibration warning value settings had to be made during trial operation. Every large rotating machine is an original and also its installation at the work station by the installation company is different, even though it should be the same. Sometimes, excessive vibrations or temperature are operating values of the machine and these adverse values cannot be reduced by making engineering modifications to individual elements by balancing, aligning, or grinding the bearings to create a smaller clearance in the bearings, for example. The result of my dissertation confirms this operational experience by laboratory tests.
- ◆ The result serves as a basis for the preparation of and comments on relevant standards and operating and maintenance instructions for specific machines,

including instructions for the analysis of diagnostic measurements. The monitoring of machines can be divided into three groups, namely:

- A visual inspection by the operator, during which the operator identifies the condition of the machine by examining and listening. Bearing temperatures are mostly measured and some organizations equip their operators with a simple vibration measuring instrument. It is necessary to add to operating and maintenance instructions that the operators should be equipped with a simple vibration measuring instrument and that all machines should be equipped with temperature measurement on their bearings. Measured values must be recorded in the inspection book. These values must be assessed on the bases of the results of my dissertation.
 - Checking machines using the offline method. The method is based on measuring the trend of vibrations at certain intervals and the condition of the machine in terms of its reliability and safety for workers is evaluated using spectral analysis. In most cases the temperatures of the bearings have not been monitored yet. This must be introduced into the methodology for measuring offline and evaluated according to the results of my dissertation.
 - Another methods of determining the technical condition of rotating machines is the online method. In most cases the vibrations of the machine are measured continuously on machines and the vibration values are set that warn the operator visually and acoustically about the values at which the machine is automatically stopped if this is possible for technological reasons. The online system must be supplemented by continuous temperature measurement and by the automatic evaluation of measured results according to the conclusions of my dissertation.
- ◆ When solving maintenance using non-invasive technical diagnostics and monitoring machines using on-line technical diagnostics, the output of my dissertation is a considerable contribution to the analysis of conditions determined by on-line or off-line control systems.

The dissertation is a basis for further research and subsequent in-situ operational measurements in the field of rotating machines, especially for determining temperatures and vibrations.

11 Literatura

- [1] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*, Ostrava 2004, 178 s., ISBN 80-248-0650-9.
- [2] HUDECZEK, M.: *Zvyšování spolehlivosti asynchronních elektromotorů včetně poháněných strojů*. Albrechtice Hudeczek Service, 2011, 299 s., ISBN 978-80-905032-0-5 (brož.)
- [3] CHMELÍK, K., POSPIŠILÍK J., FOLDYNA J.: *Ložiskové proudy v elektrických strojích*. Prosinec 2008, 186 s., ISBN 987-80-7225-290-9.
- [4] CHMELÍK, K. – ZÁLIŠ, K – MIŠÁK, S. – KOZELSKÝ, J. *Technická diagnostika a elektrických zařízení*. 1. vydání, Zlín: ATD ČR, o.s., 140 stran.
- [5] KOPÁČEK, J.: *Pohony a převody*. Skripta VŠB–TU Ostrava 2000, ISBN 80-7078-806-2
- [6] KREIDL, M., ŠMÍD, R., *Technická diagnostika*, Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2006, 408 s., ISBN 80-7300-158-6
- [7] JANOUŠEK, J. Kozák O. Taraba a kol. *Technická diagnostika I*. SNTL, 1988 Praha, s: 429
- [8] NĚMĚČEK, P. *Nejistoty měření*, Praha, 2008, s: 98, ISBN 978-80-02-02089-9,
- [9] VINŠ J.: *Kluzná ložiska*, Praha 1971, 376 s., 04-235-71
- [10] WARNECKE, J.: *Walzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen*. VEB Verlag Technik, Berlin 1985, 206 s.,
- [11] BRYCHCY, J.: *Analýza a verifikace vibrací konstrukčních uzlů pohonné jednotky*. Doktorská disertační práce, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2011, 103 s.

- [12] GABRHELOVÁ, L., *Technický stav ložisek papírenského stroje*, Bakalářská práce, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2007, 43 s.
- [13] GABRHELOVÁ, L., *Vliv vibrací na teplotu kluzných ložisek*, Diplomová práce, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2009, 60 s.
- [14] HUDECZEK, M., *Ověřování provozuschopnosti hlubinných dobývacích strojů*. Doktorská disertační práce, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2001, 116 s.
- [15] MONI, V., *Vliv teplotního obrazu zubu korečku kola na jeho životnost*. Doktorská disertační práce, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2011, 122 s.

Normy a předpisy

- [16] ČSN ISO 18434-1 – *Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy*, červenec 2009
- [17] ČSN ISO 10816 – 1, *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 1: Všeobecné směrnice*, ČNI 1998, s. 22.
- [18] ČSM ISO 10816 – 2, *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 2: Velké stacionární parní turbogenerátory s výkonem nad 50 MW*, ČNI 1998, 1 s.
- [19] ČSM ISO 10816 – 3, *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min 15 000 1/min při měření in situ*, ČNI 1999, s.15.
- [20] <http://www.skf.com>
- [21] http://www.skf.com/portal/skf/home/products?newlink=1_0_17&lang=en

- [22] <http://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>
- [23] <http://www.transformacni-technologie.cz/prenos-energie-elektromagnetickym-zarenim.html>
- [24] <http://www.elektrotrh.cz/casopis/2011/cervenec/files/assets/seo/page39.html>
- [25] <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01041/index.html>
- [26] <http://homel.vsb.cz/~krz011/4kapitola.pdf>
- [27] www.mmspektrum.com/clanek/priciny-vzniku-a-omezeni-loziskovych-proudu-motoru.html
- [28] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>
- [29] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0204.htm>
- [30] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0203.htm>

Podnikové materiály a výstupní protokoly z měření

- [31] HUDECZEK, M., BRYCHCY, J., GABRHELOVÁ, L., *Protokoly z vyhodnocení vibrací*. HUDECZEK SERVICE, s.r.o., Zakázkové listy
- [32] HUDECZEK, M., GABRHELOVÁ, L., *Termografické protokoly*. HUDECZEK SERVICE, s.r.o., Zakázkové listy
- [33] *Bezporuchový provoz., Podkladové materiály SKF*. [s.l.] : [s.n.], 2002. 141 s.
- [34] HUDECZEK, M., *Školící materiály Fa* – HUDECZEK SERVICE, s.r.o.,

12 Seznam vlastních prací

1. Původní článek v odborném časopise

GABRHELOVÁ, L. – JURMAN, J. Temperature of Bearings of rotating Machines as a Result of Vibration. *Sborník vědeckých prací VŠB - TU Ostrava*, 2010, č. 1, ročník LVI, řada strojní, článek č. 1747, s. 81-88. ISBN 978-80-248-2302-7. ISSN 1210-0471

2. Původní článek v zahraničním časopise

GABRHELOVÁ, L. – JURMAN, J. - HUDECZEK, M. – UČEŇ, O. The Technical Conditions of the Paper Machine Bearings. *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa*, 2010, Nr.4, s. 60. PL ISSN 0860-6846 CD 6 s.

3. Publikovaný příspěvek na vědecké konferenci

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M. – JURMAN, J. Vliv vibrací na teplotu kluzných ložisek. In *Sborník XII. Mezinárodní konference DIS – Teória a aplikácia metód technickej diagnostiky. Košice 08.10.2009-09.10.2009*. Košice: TU v Košicích, 2009, s. 55-61. ISBN 978-80-553-0221-8, CD

4. Publikovaný příspěvek na vědecké konferenci

GABRHELOVÁ, L. Application vibrafon research in relation to temperature bearings rotating machine. In *Sborník 29. mezinárodní konference DIAGO 2010 – Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení. Rožnov 02.02.2010-03.02.2010*. Ostrava: AHA TRADING, s.r.o., 2010, s.. ISBN 1210-311X, CD

5. Publikovaný příspěvek na vědecké konferenci

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M. Revize elektrozařízení pomocí termografie. In *Sborník 30. mezinárodní konference DIAGO 2011 – Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení. Rožnov 31.01.2011-02.02.2011*. Ostrava: AHA TRADING, s.r.o., 2011, s.. ISBN 1210-311X, CD

6. Publikovaný příspěvek na mezinárodní vědecké konferenci

GONDEK, H. – HUDECZEK, M. – GABRHELOVA, L. Badania aplikacyjne zwiazku pomiedzy drganiami a stanem cieplnym lozysk slizgowych. *Miedzynarodowa konferencja naukowo-techniczna TEMAG 2011 – Gliwice – Ustron 19.10. 2011 - 21. 10. 2011, s. 93-103.* ISBN 978-83-61442-20-2

7. Publikovaný příspěvek na konferenci

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M. Ověřování spolehlivosti dobývacích a razicích strojů. In. *Sborník V. KONFERENCE – Strojní zařízení používaná při hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, jejich bezpečnost a nové trendy. Ostrava 27. 04. 2011 – 28. 04. 2011.* Ostrava: MONTANEX, s. 17-31., CD

8. Publikovaný příspěvek na vědecké konferenci

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M. – CHUPÁČ, L. Audits tests on electrical equipment by thermography. In. *Sborník příspěvků INInet – Národní konference - Průmyslové inženýrství – multiprofesní spolupráce v inovačním procesu. Kroměříž 27. 05. 2011.* Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, s.42-48. ISBN:978-80-7454-130-8

9. Publikovaný příspěvek na konferenci

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M Pravidelné revize za účasti termovize In. *Sborník. VI. KONFERENCE – Elektrická zařízení používaná při hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, jejich bezpečnost a nové trendy. Ostrava 26. - 27. 4. 2012* Ostrava: MONTANEX,CD

10. Publikovaný příspěvek na mezinárodní vědecké konferenci

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M. – BRYCHCY, J. Souvislost mezi teplotou a vibracemi v diagnostice rotačních strojů. *XII. Ročník medzinárodnej konferencie doktorandov strojnických fakúlt technických univerzít a vysokých škôl NOVUS SCIENTIA 2013* - Košice – 10. 4. 2013, ISBN.978-80-553-1380-1

11. Publikovaný příspěvek na mezinárodní vědecké konferenci

HAPLA, T. – GABRHELOVÁ, L. – FRIES, J. Inovace přesypových stanic pro eliminace poruch dopravního pásu. *XII. Ročník medzinárodnej konferencie doktorandov strojnických fakúlt technických univerzít a vysokých škôl NOVUS SCIENTIA 2013- Košice – 10. 4. 2013*, ISBN.978-80-553-1380-1

12. Publikovaný příspěvek na konferenci

HUDECZEK, M. – GABRHELOVÁ, L. – BRYCHCY, J. Závislost mezi teplotou a vibracemi v souvislosti s diagnostikou stavu rotačních In *Sborník přednášek a referátů z VI. KONFERENCE – Strojní zařízení používaná při hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, jejich bezpečnost a nové trendy. Sepetná 25. – 26. 4.2013 Ostrava: MONTANEX,CD, ISBN:78-80-7225-387-6*

13. Publikovaný příspěvek na mezinárodní vědecké konferenci

GONDEK, H. – HUDECZEK, M. – PLCHOVÁ, A. – GABRHELOVA, L. Okrešlenie funkcjonalności maszyn górniczych za pomocą bezdemontażowych metod diagnostyki. *Miedzynarodowa konferencja naukowo-techniczna TEMAG 2012 – Gliwice – Ustron 17.10. 2011 - 19. 10. 2012*, ISBN 978-83-61442-20-2

14. Původní článek v odborném časopise

HUDECZEK, M. – GABRHELOVÁ, L. – BRYCHCY, J. Souvislost mezi teplotou a vibracemi v diagnostice rotačních strojů a elektromotorů, *EVP – elektrotechnika v praxi, odborný elektrotechnický časopis, s. 62-64. 23. Ročník, 5-6/2013*

15. Původní článek v zahraničním elektronickém časopise

GABRHELOVÁ, L. – HUDECZEK, M. – BRYCHCY, J. Souvislost mezi teplotou a vibracemi v diagnostice rotačních strojů. *TRANSFER INOVACÍ Internetový časopis o inováciách v priemysle ISSN 1337 – 7094. Transfer inovácií - špecializovaný elektronický časopis zameraný na vedecko-technické výstupy grantových a podnikových inovačných stratégií. Číslo 25/2013*

16. Původní článek v zahraničním elektronickém časopise

HAPLA, T. – GABRHELOVÁ, L. – FRIES, J. Inovace přesypových stanic pro eliminace poruch dopravního pásu. TRANSFER INOVACÍ Internetový časopis o inovaciách v priemysle ISSN 1337 – 7094. Transfer inovácií - špecializovaný elektronický časopis zameraný na vedecko-technické výstupy grantových a podnikových inovačných stratégií. Číslo 25/2013

17. Publikovaný příspěvek

HUDECZEK, M. – GABRHELOVÁ, L. – BRYCHCY, J. – Souvislost mezi teplotou a vibracemi v diagnostice rotačních strojů a elektromotorů, *VLII. Sešit katedry elektrotechniky*, 19. 6. 2013 Ostrava, s. 28-31. ISBN 978-80-248-2995-1